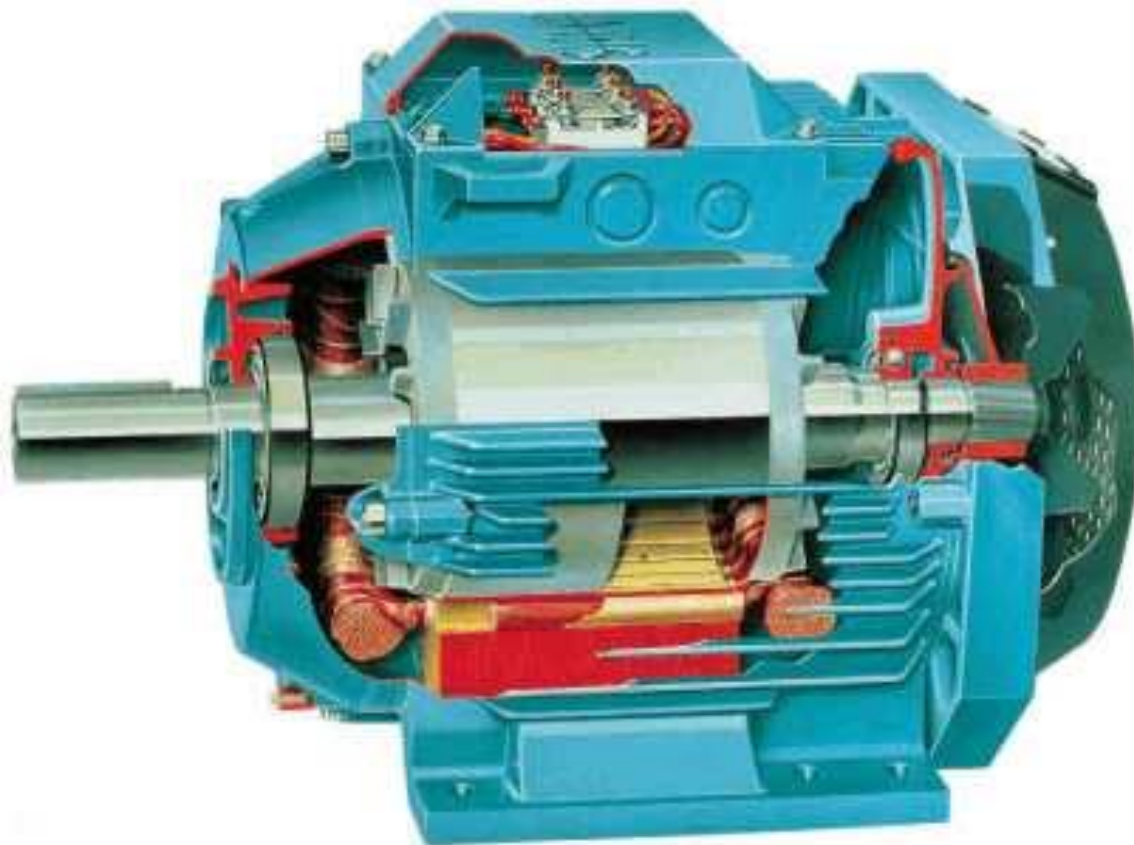


Les machines asynchrones

2022 / 2023



Les machines asynchrones sont utilisées généralement comme moteurs.

80% des moteurs électriques sont des moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones sont très robustes

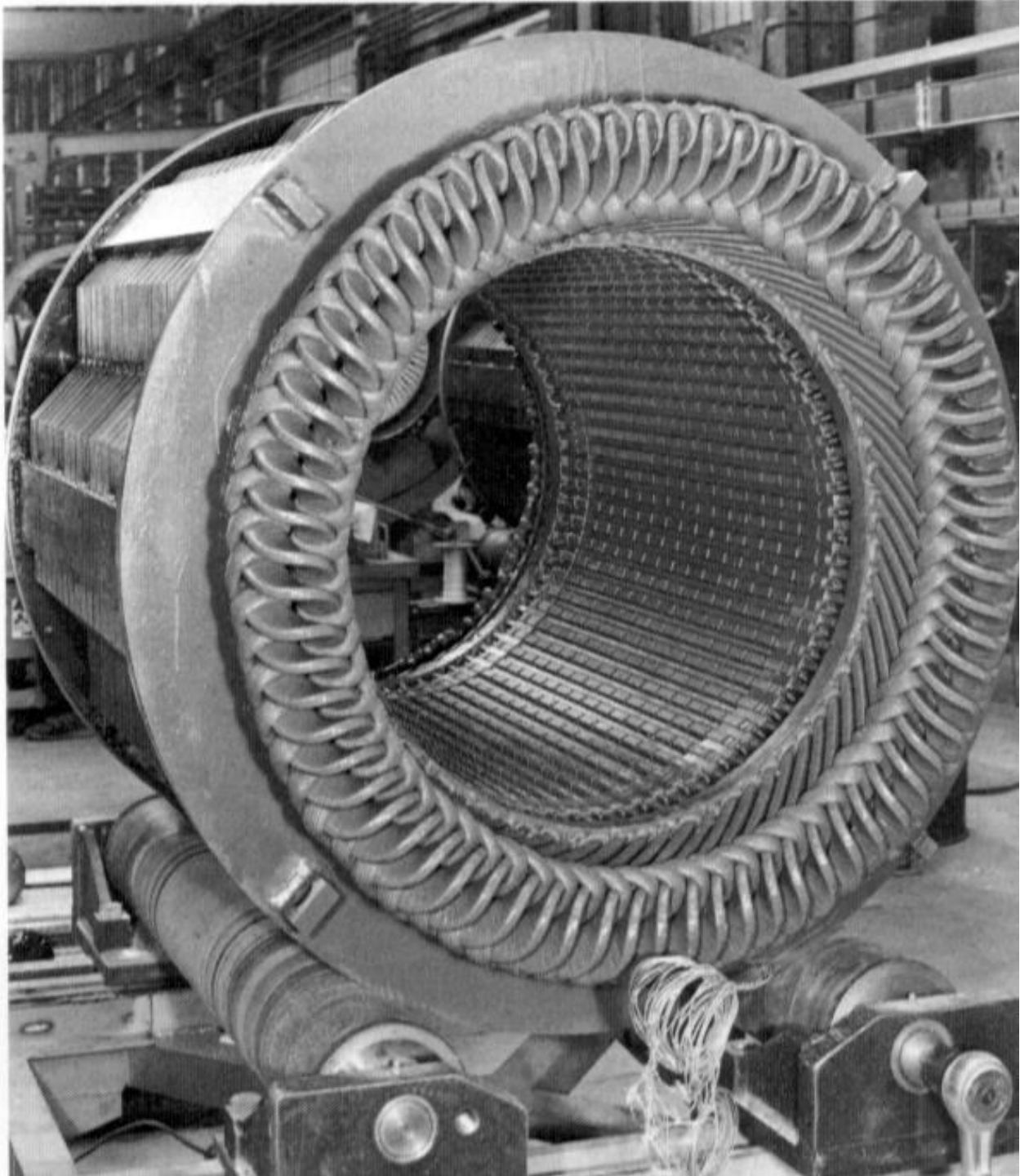
Leur gamme de puissance s'étale de quelques watts à une dizaine de mégawatts.

Constitution de la machine asynchrone

Le stator

La machine asynchrone est constituée d'un stator semblable à celui d'une machine synchrone.

Ce stator, alimenté par des courants triphasés, produit un champ magnétique tournant.



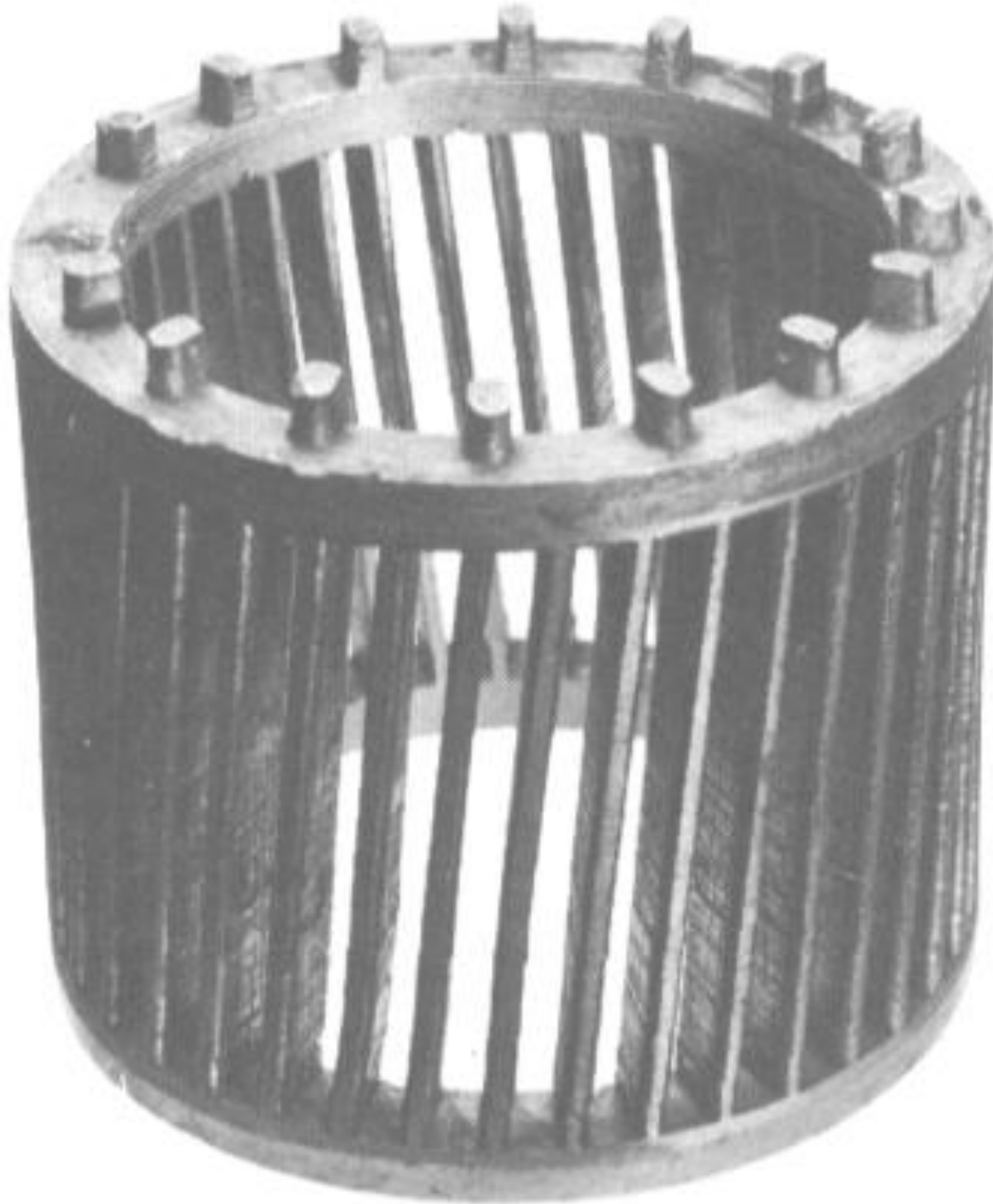
Le rotor

Rotor en cage d'écureuil

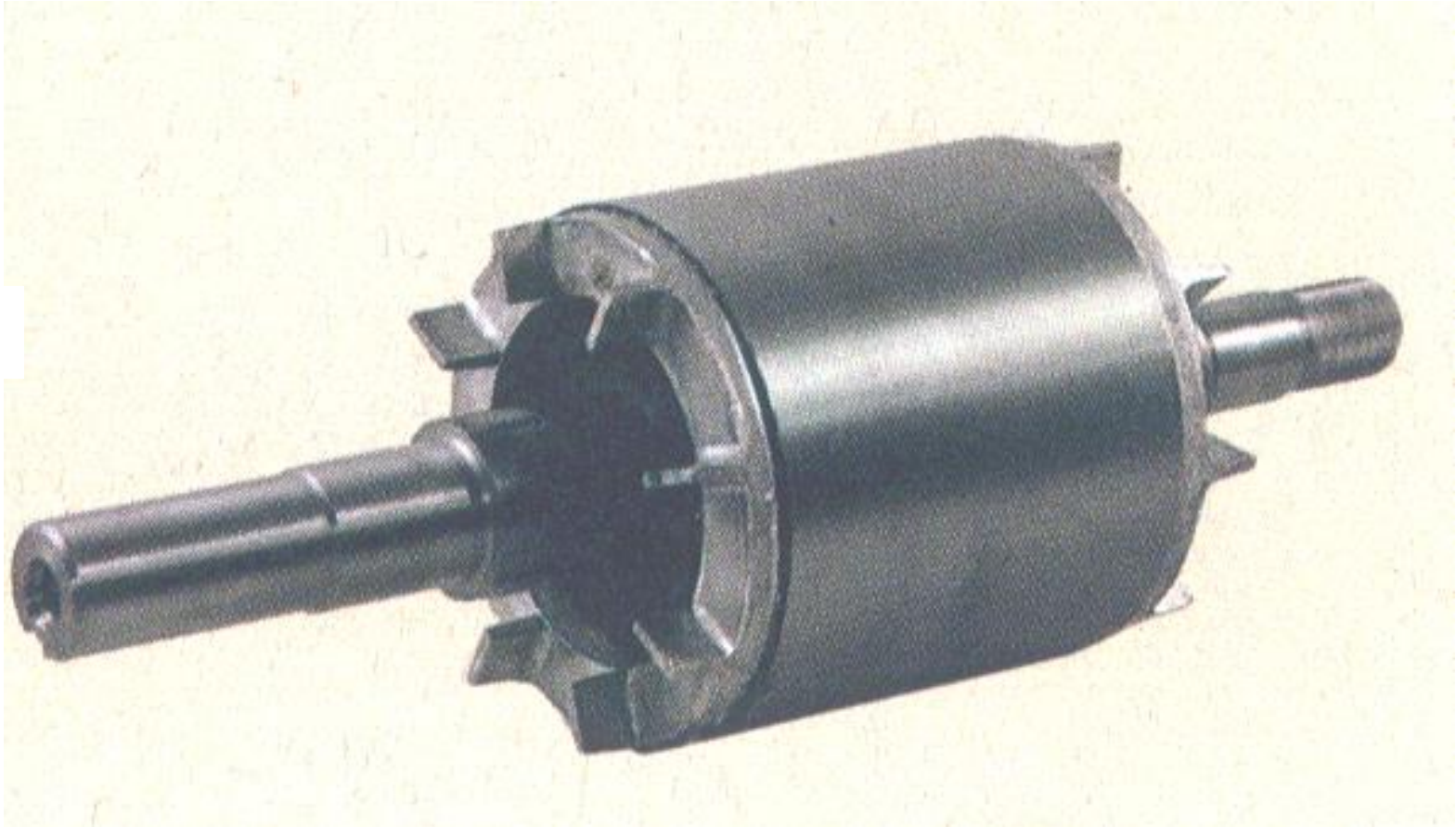
Ce rotor est constitué d'un ensemble de conducteurs en court-circuit appelé « cage d'écureuil »

-

Cage d'écureuil en aluminium moulé



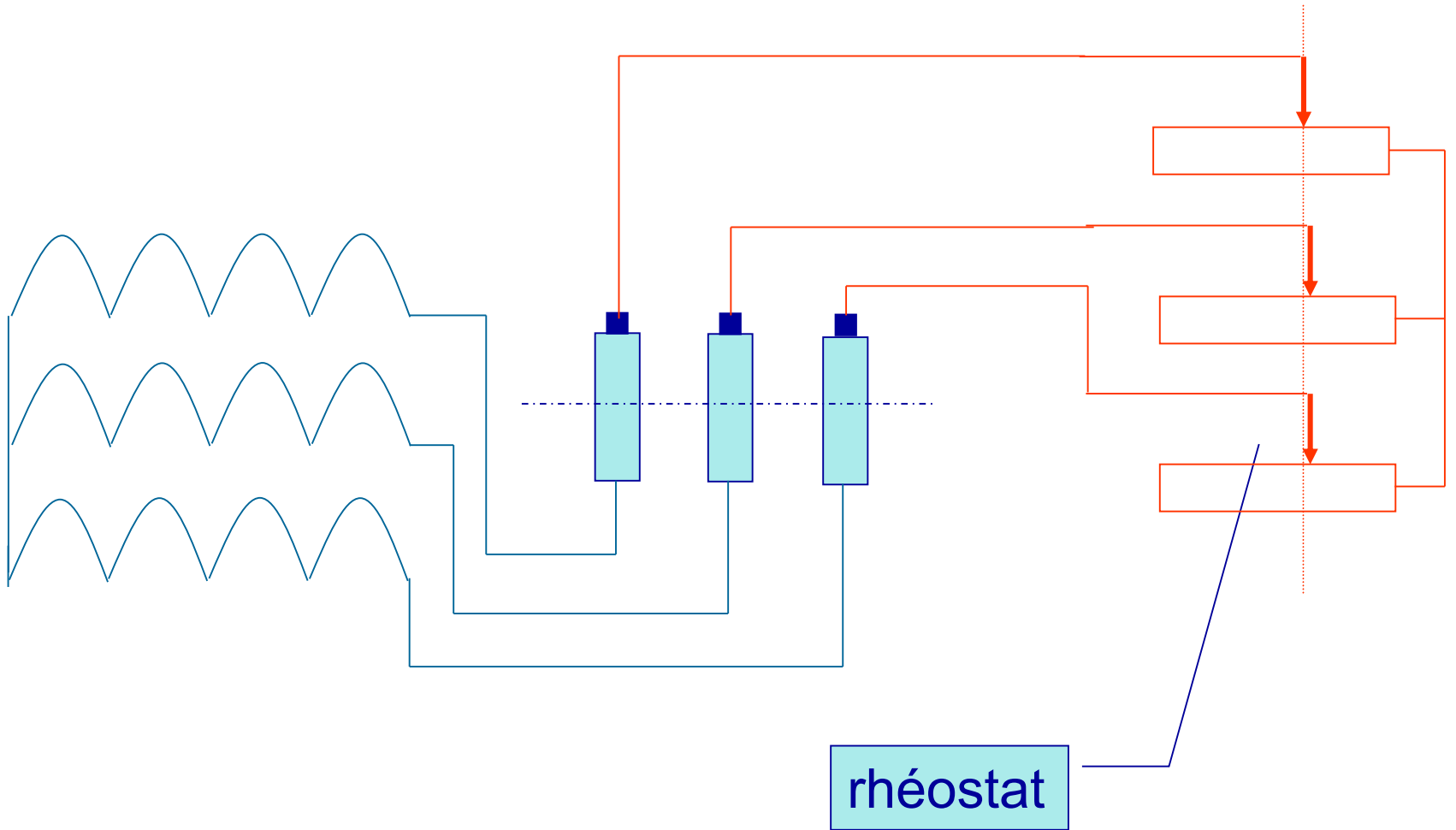
Rotor en cage d'écureuil



Rotor bobiné



Rotor bobiné

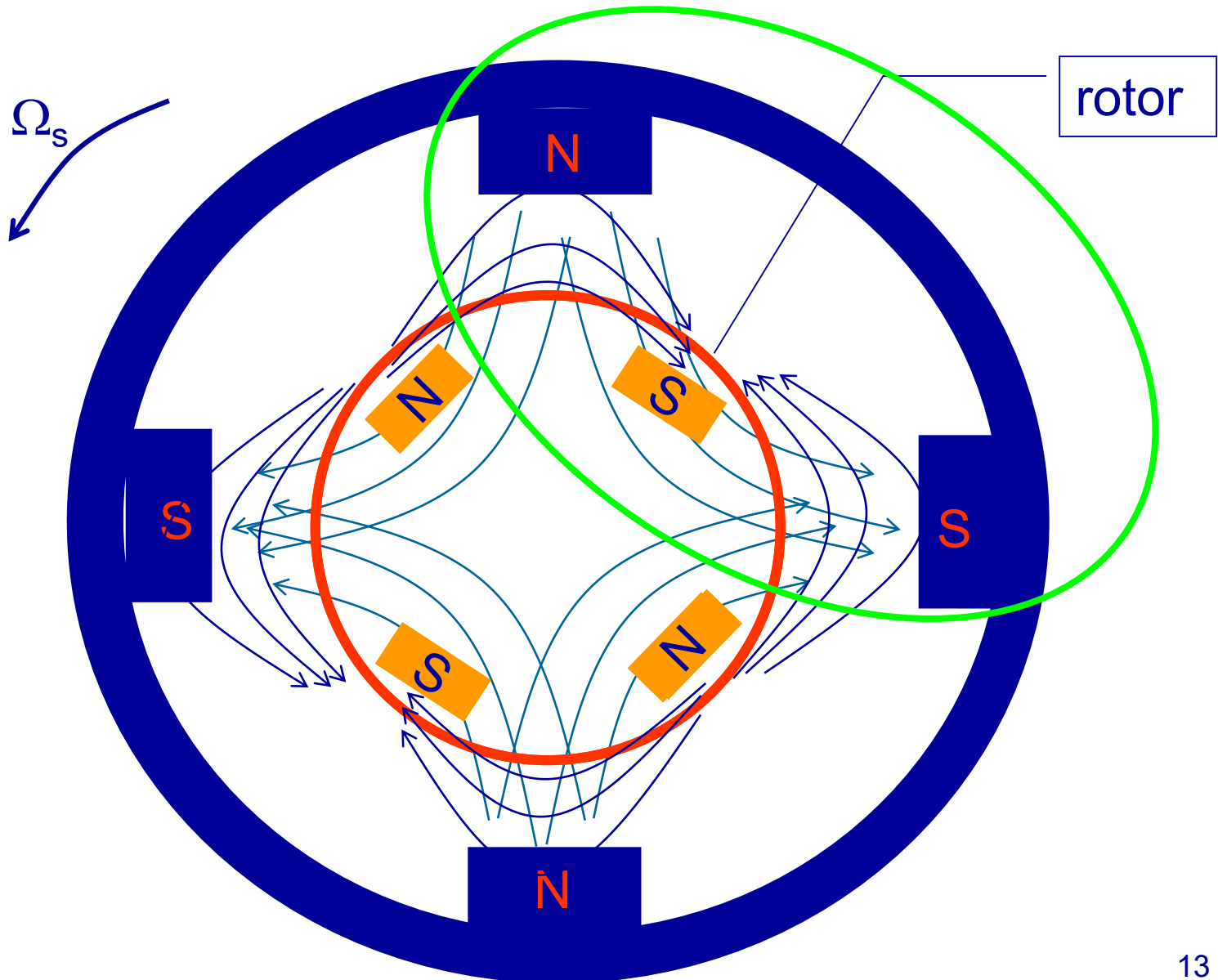


Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

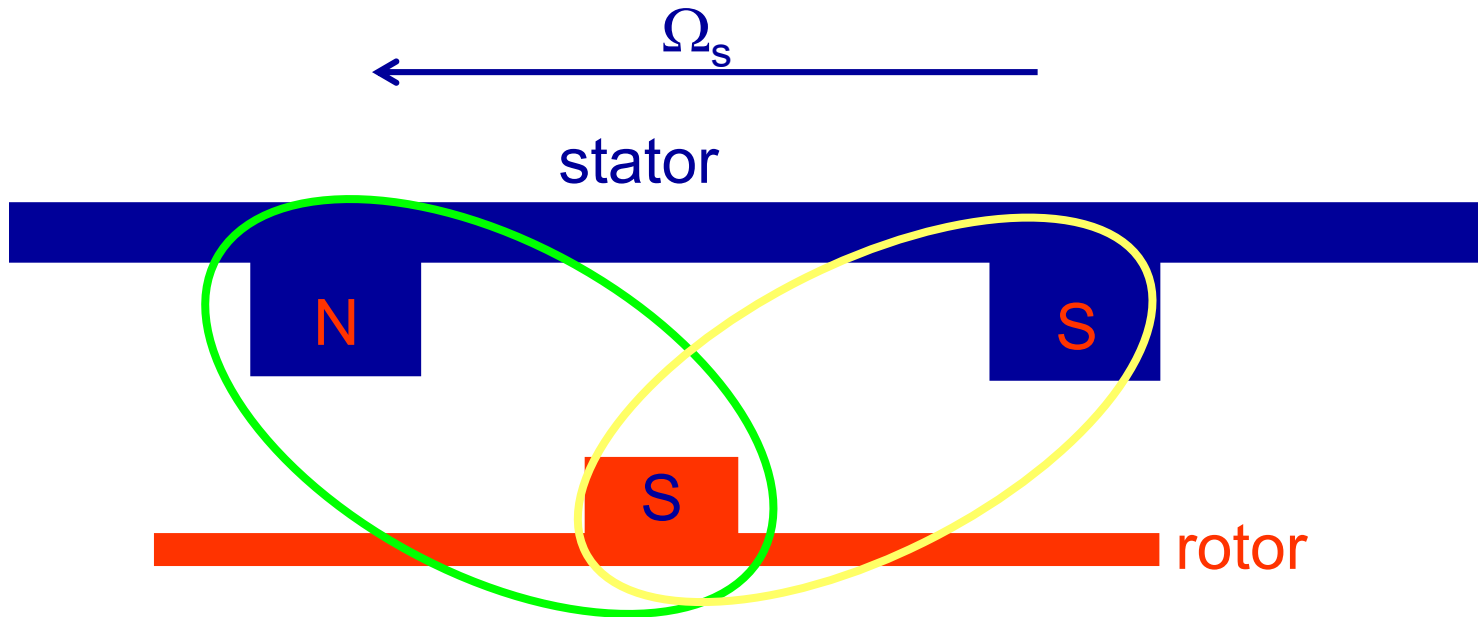


Principe de fonctionnement de la machine asynchrone¹²

Stator tétra polaire



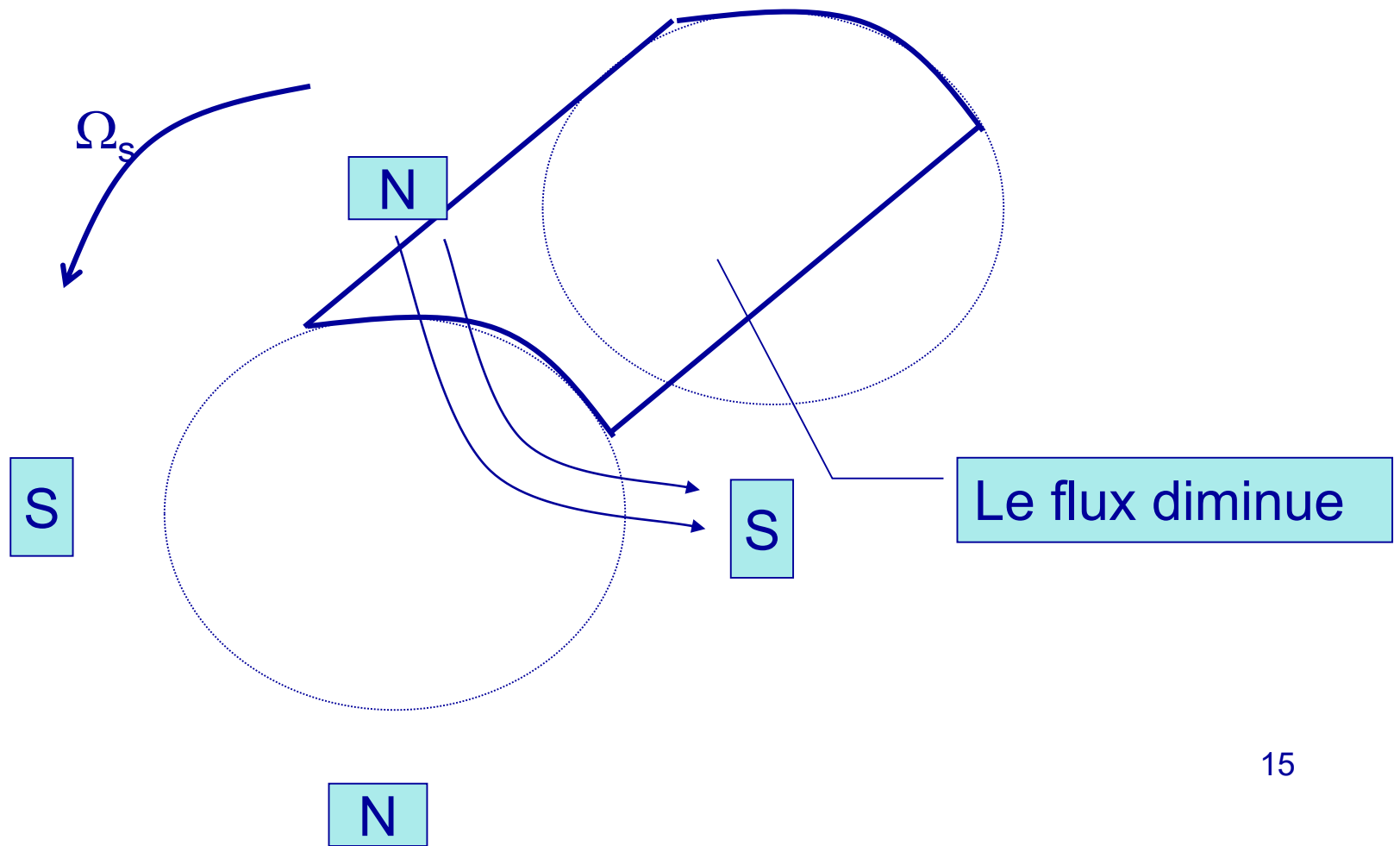
Mise en rotation du rotor



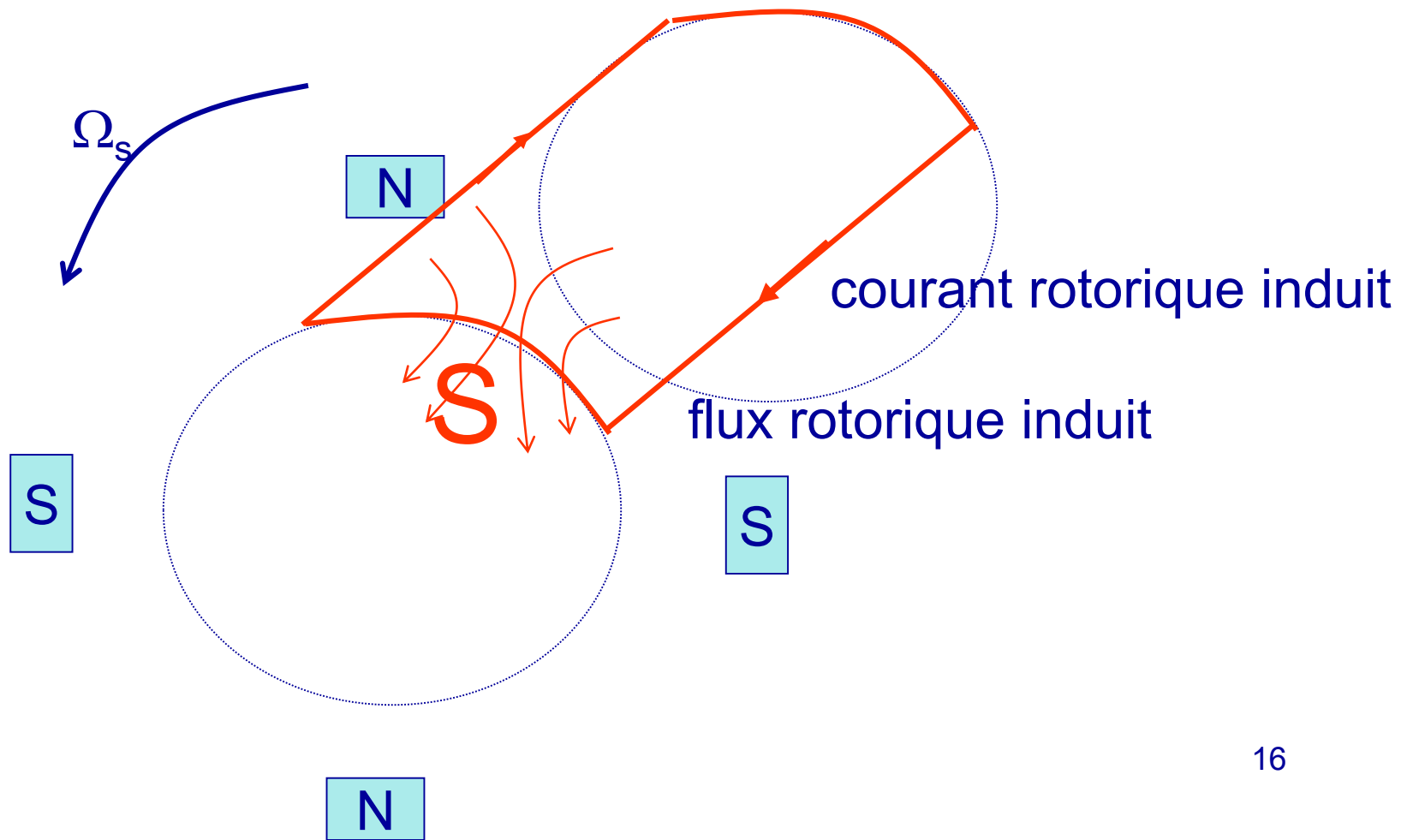
Le pôle nord stator tire
le pôle sud rotor

Le pôle sud stator repousse
le pôle sud rotor

Apparition des pôle dans le rotor



Apparition des pôles dans le rotor



Sur la périphérie du rotor, il y a nécessairement autant de pôles que sur le stator; cela résulte de leur nature :
ce sont des pôles induits

Ces pôles tournent à la même vitesse de rotation que ceux du stator

L'attraction/répulsion mutuelle entre pôles statoriques et rotoriques développe le couple moteur; ce couple est le **couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique résulte des courants induits, et donc des variations de flux.

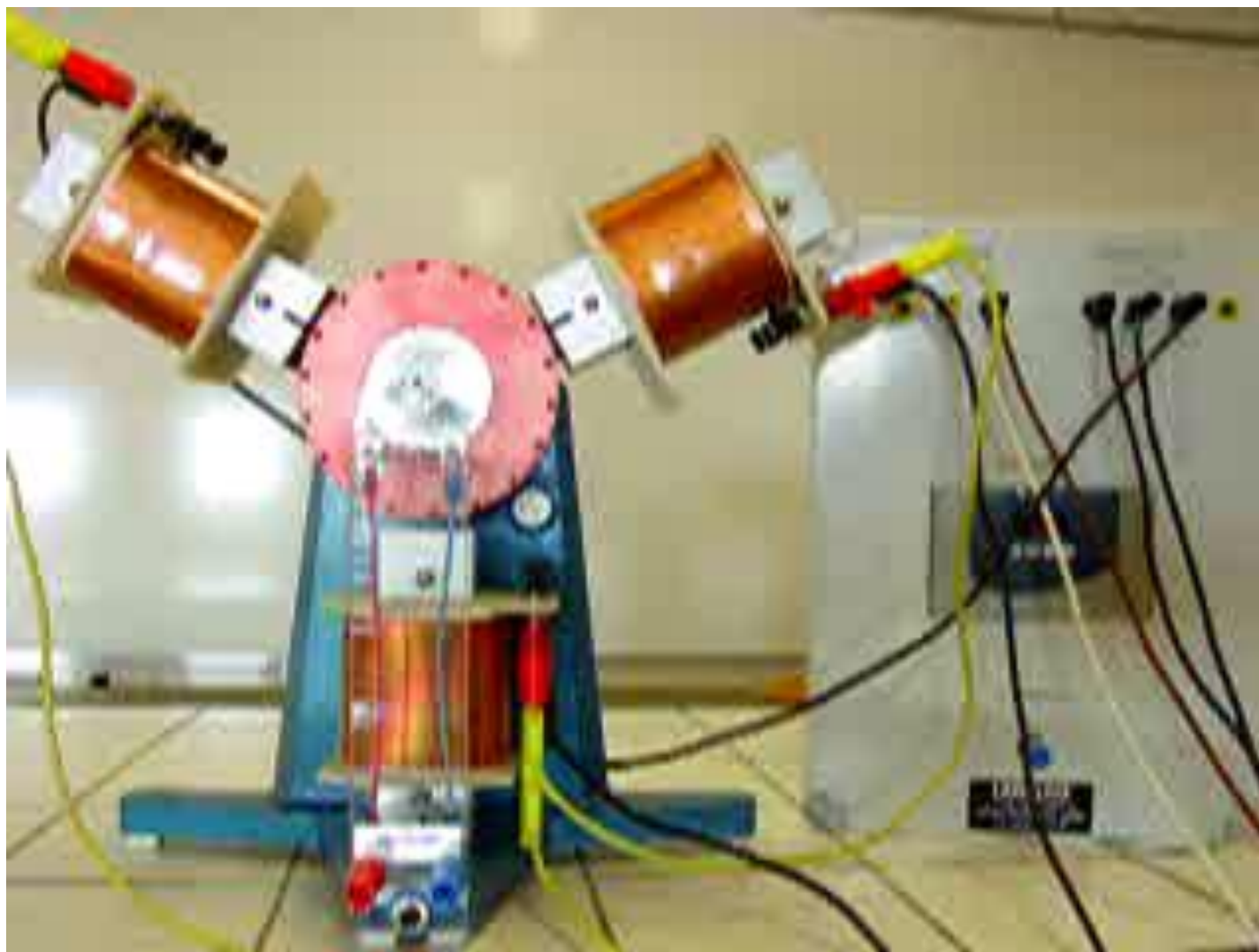
Si le rotor tourne à la même vitesse que le champ statorique, il n'y a plus de variation de flux.

Donc le rotor ne peut tourner qu'à une vitesse inférieure à celle du champ statorique.

Le rotor tourne à une vitesse $N_r < N_s$ inférieure à celle du champ statorique. Le rotor **glisse** donc par rapport à ses propres pôles. Ce **glissement** provoque une perte d'énergie qui lui est proportionnelle.

La vitesse de synchronisme ne peut en aucun cas être atteinte (en fonctionnement moteur). D'où le nom de machine **asynchrone**.

Rotor à cages dans un champ tournant

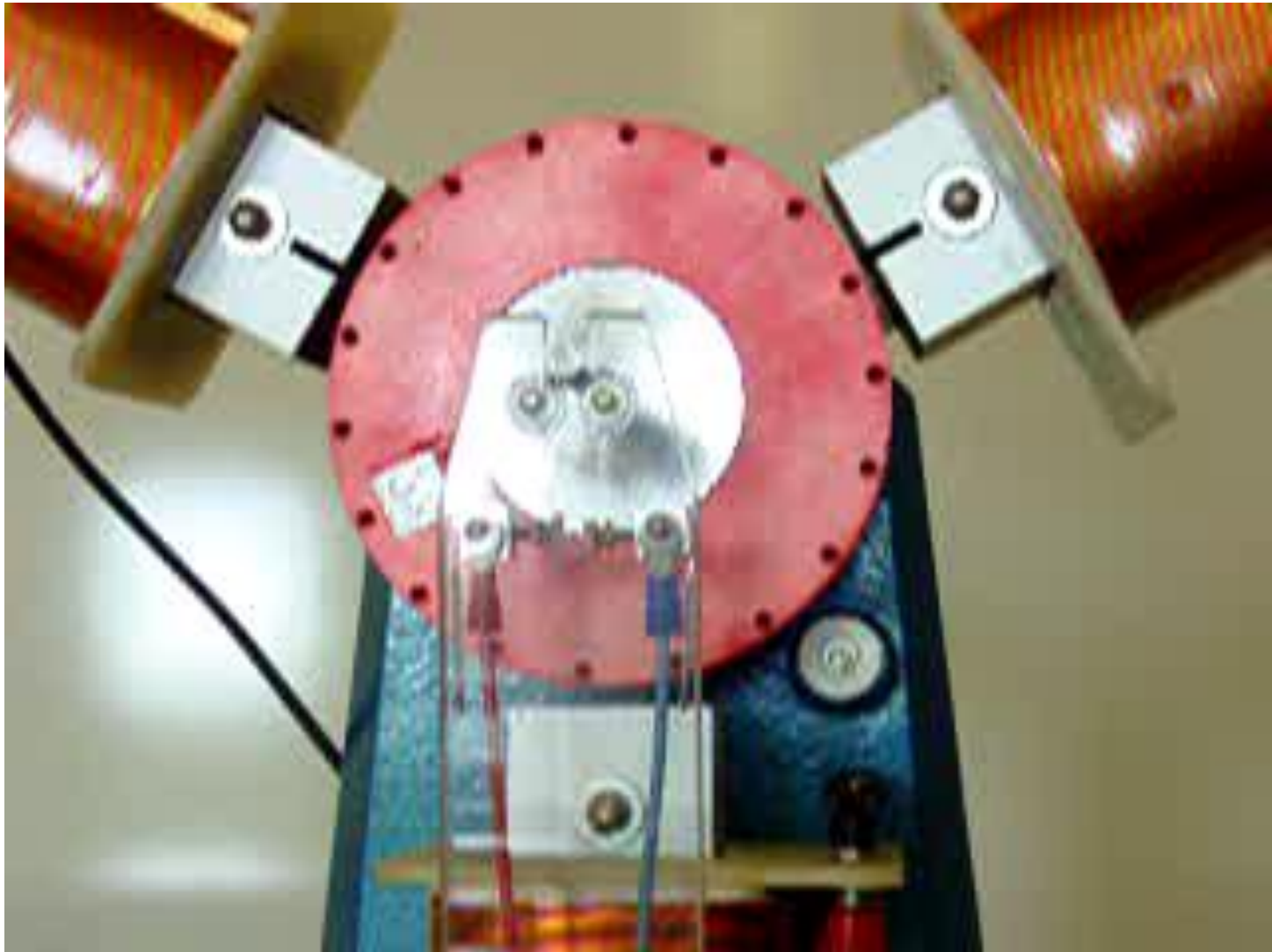


Rotation sens trigonométrique

Rotor à cages dans un champ tournant



Rotation sens horaire



Agrandissement sur le rotor à cages

Bilan de puissance du moteur asynchrone

Puissance absorbée

$$P_a = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1$$

Pertes magnétiques stator

Pertes Joule stator

Puissance transmise au rotor

$$P_e = C_e \cdot (2\pi \cdot N_s)$$

Pertes magnétiques rotor ≈ 0

Pertes Joule rotor

Puissance mécanique

$$P_m = C_e \cdot (2\pi \cdot N_r)$$

Pertes mécaniques

Puissance utile

$$P_u = C_u \cdot (2\pi \cdot N_r)$$

N_s et N_r en tours/s

$$N_s = f_s / p$$

Puissance absorbée

$$P_a = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1$$

Pertes magnétiques stator

Pertes Joule stator

Puissance transmise au rotor

$$P_e = C_e \cdot (2\pi \cdot N_s)$$

Pertes magnétiques rotor ≈ 0

Pertes Joule rotor

Puissance mécanique

$$P_m = C_e \cdot (2\pi \cdot N_r)$$

Pertes mécaniques

Puissance utile

$$P_u = C_u \cdot (2\pi \cdot N_r)$$

stator

rotor

Puissance absorbée

$$P_a = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

Pertes magnétiques stator

Pertes Joule stator

Puissance transmise au rotor

$$P_e = C_e \cdot (2\pi \cdot N_s)$$

Pertes magnétiques rotor ≈ 0

Pertes Joule rotor

Puissance mécanique

$$P_m = C_e \cdot (2\pi \cdot N_r)$$

Pertes mécaniques

La transmission de puissance au rotor se fait avec perte de vitesse mais à couple constant

Puissance utile

$$P_u = C_u \cdot (2\pi \cdot N_r)$$

Puissance transmise au rotor

$$P_e = C_e \cdot (2\pi \cdot N_s)$$

Pertes magnétiques rotor ≈ 0

Pertes Joule rotor

Puissance mécanique

$$P_m = C_e \cdot (2\pi \cdot N_r)$$

La différence de puissance est perdue par effet Joule dans le rotor

$$p_{jr} = C_e \cdot 2\pi \cdot N_s - C_e \cdot 2\pi \cdot N_r = C_e \cdot 2\pi \cdot (N_s - N_r)$$

Introduisons le glissement : $g = \frac{N_s - N_r}{N_s}$

$$P_{jr} = g \cdot 2\pi \cdot C_e \cdot N_s = g \cdot P_e$$

Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_m} \cdot \frac{P_m}{P_e} \cdot \frac{P_e}{P_a} < \frac{P_m}{P_e}$$

<1 <1

$$\frac{P_m}{P_e} = \frac{N_r}{N_s} = 1 - g \quad \Rightarrow \quad \eta < \frac{N_r}{N_s} = 1 - g$$

Modélisation de la machine asynchrone

Etablissement du modèle électrique
d'une phase de la machine
asynchrone

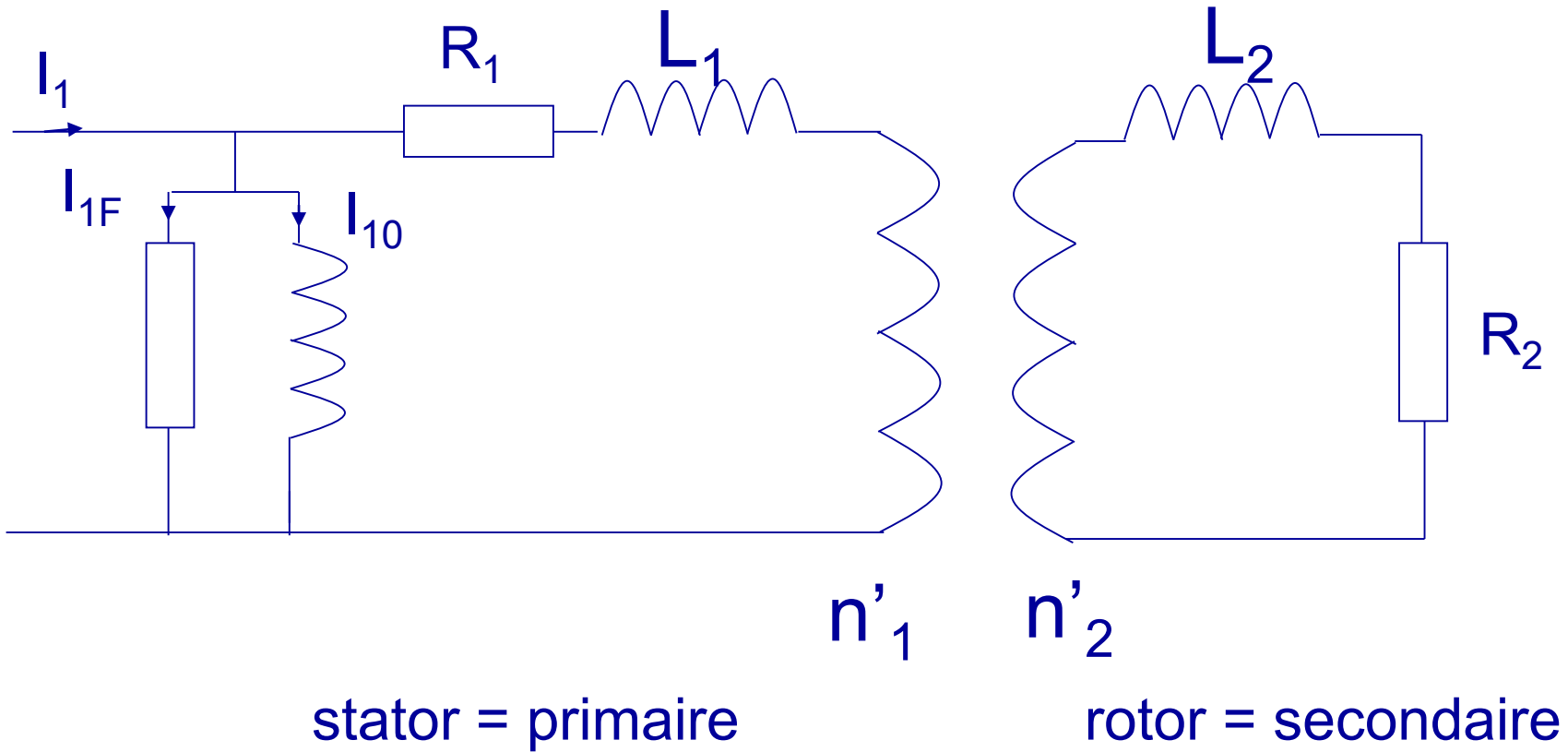
La machine asynchrone est un transformateur à champ tournant.

I_1 - le courant d'une phase statorique,
 I_2 - le courant d'une phase rotorique.

Ces courants engendrent des forces magnétomotrices tournantes de vitesse N_s :

$n'_1 I_1$ et $n'_2 I_2$,

n'_1 et n'_2 étant les nombres de spires de chaque enroulement corrigés par les coefficients de Kapp.



Quelle est la fréquence des courants rotoriques ?

La vitesse relative de l'induction statorique par rapport au rotor est :

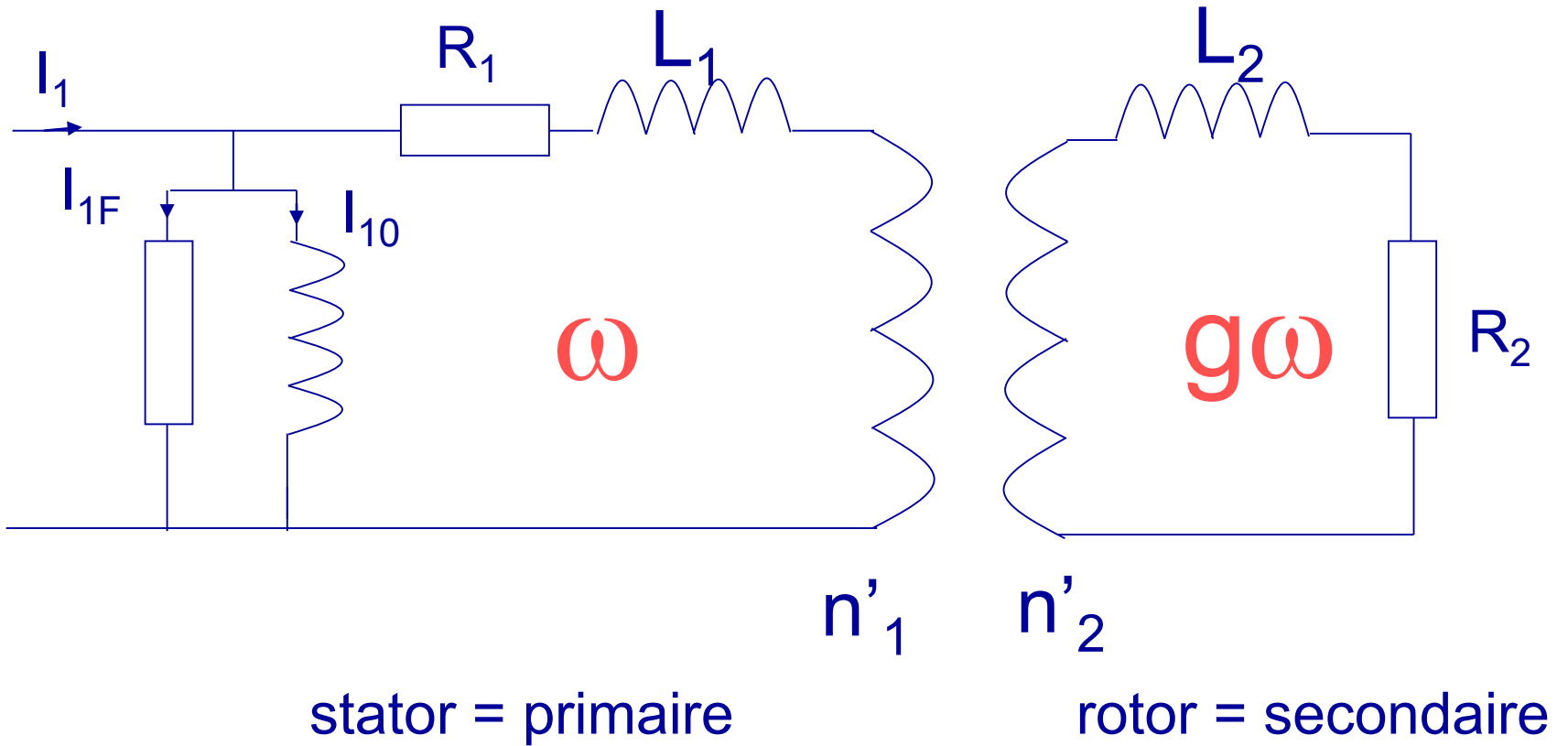
$$N = N_s - N_r = g \cdot N_s$$

Le rotor ayant p paires de pôles, la fréquence des f.é.m. rotoriques est donc :

$$\Omega = (2\pi \cdot f)/p \Rightarrow f = p \cdot (g \cdot N_s)$$

$$\text{Or } N_s = f_s/p$$

$$\text{Donc } f = g \cdot f_s$$



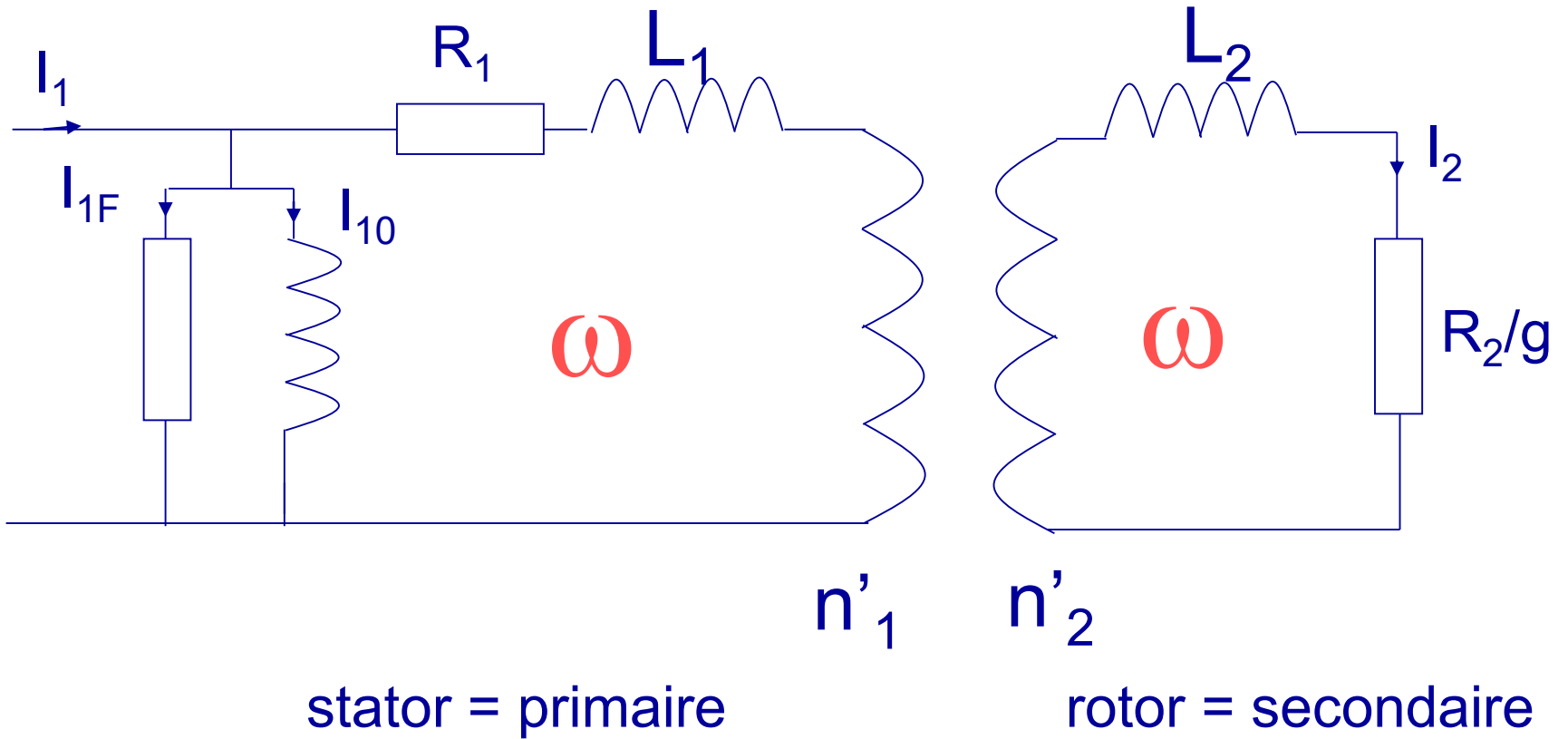
Pour une phase du stator :

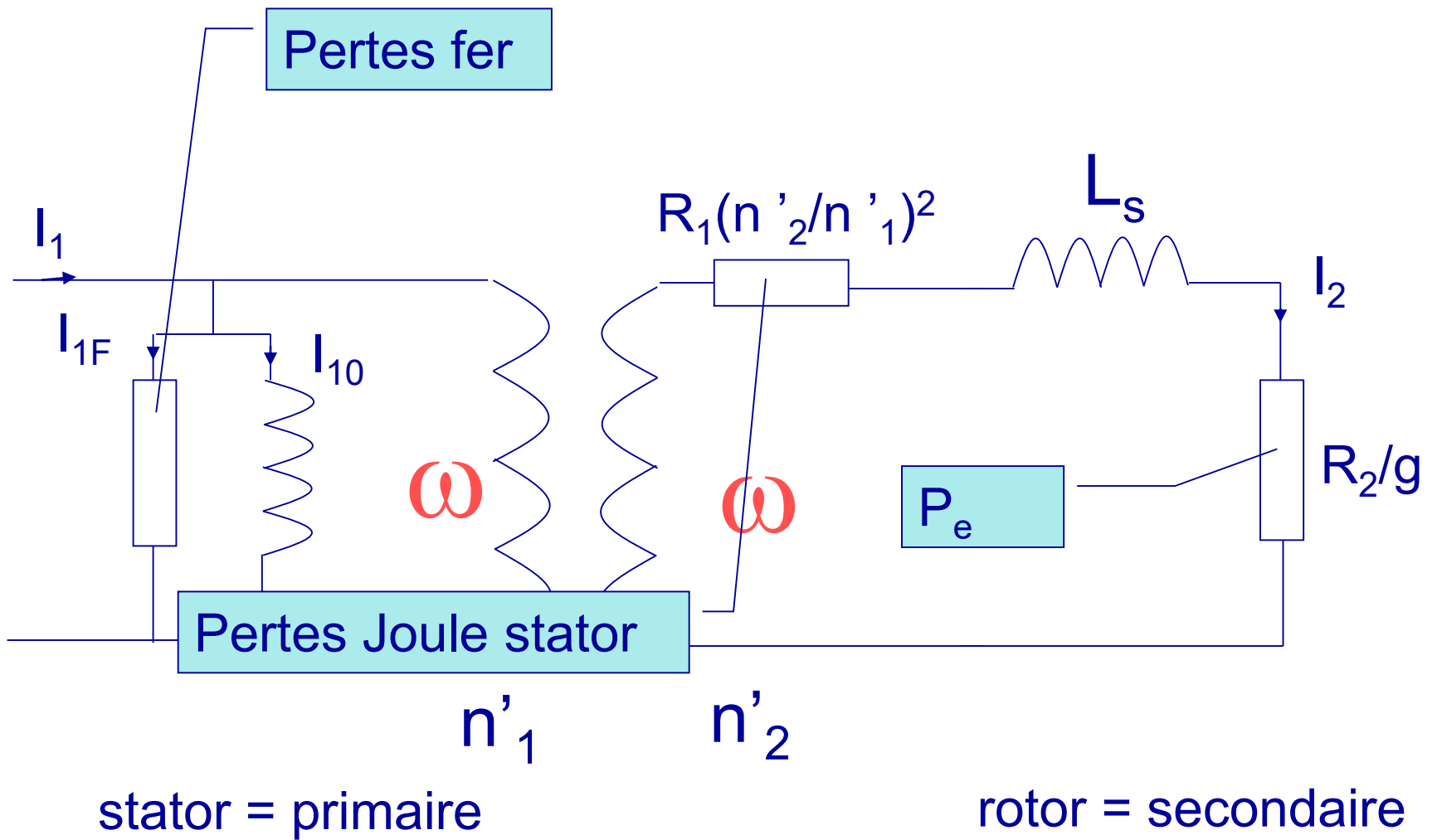
$$\underline{V}_1 = j n'_1 \omega \underline{\phi} + j \omega L_1 \underline{I}_1 + R_1 \underline{I}_1$$

Pour une phase du rotor :

$$\underline{V}_2 = 0 = j n'_2 (g\omega) \underline{\phi} - j (g\omega) L_2 \underline{I}_2 - R_2 \underline{I}_2 \quad \Bigg| \quad : g$$

$$0 = j n'_2 \omega \underline{\phi} - j \omega L_2 \underline{I}_2 - \frac{R_2}{g} \underline{I}_2$$





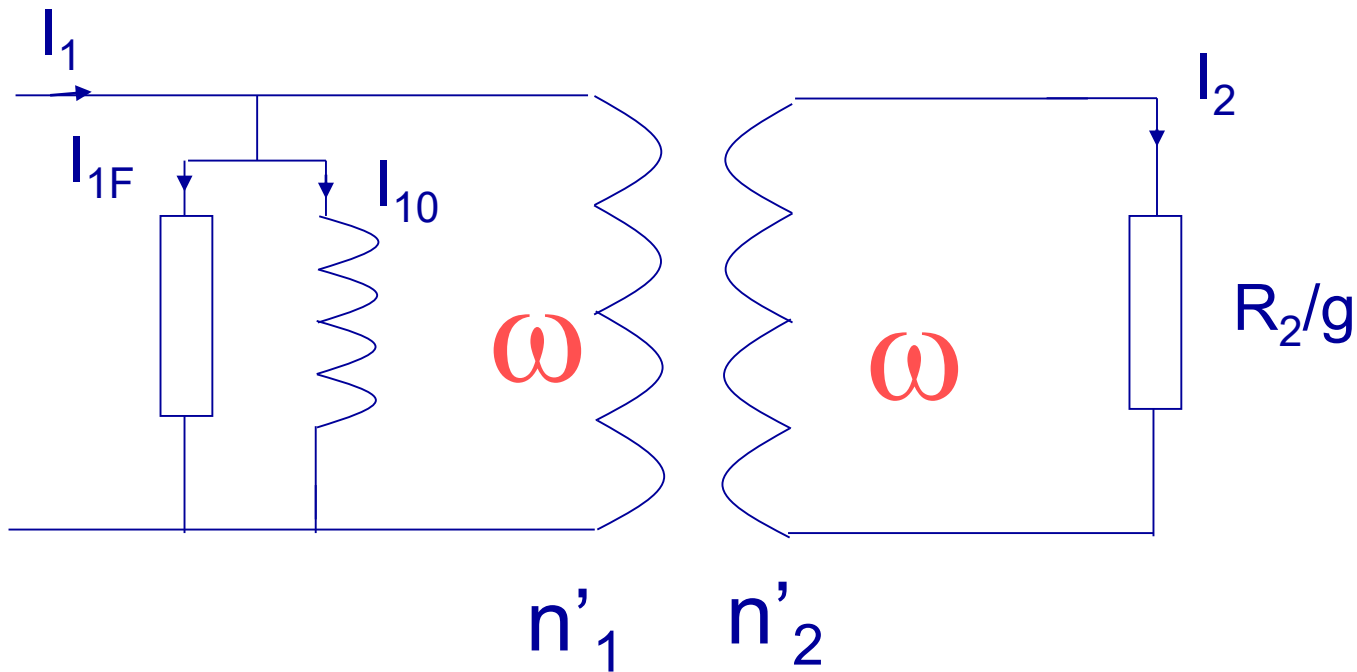
$$L_s = L_2 + \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 \cdot L_1$$

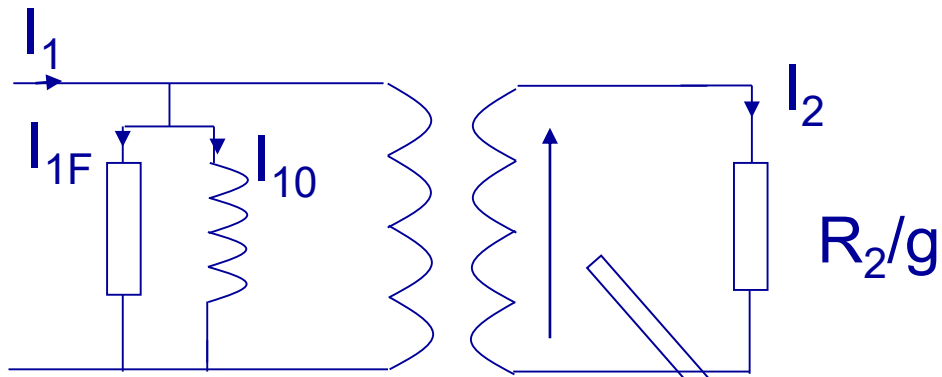
Couple et courant à glissement faible

On suppose :

$R_2/g \gg L_s \omega$ et on néglige $R_1(n'_2/n'_1)^2$

Le schéma équivalent devient :





$$\frac{n_2'}{n_1'} \underline{V}_1 = \frac{R_2}{g} \underline{I}_2$$

$$\underline{I}_2 = \frac{n_2'}{n_1'} \underline{V}_1 \frac{g}{R_2}$$

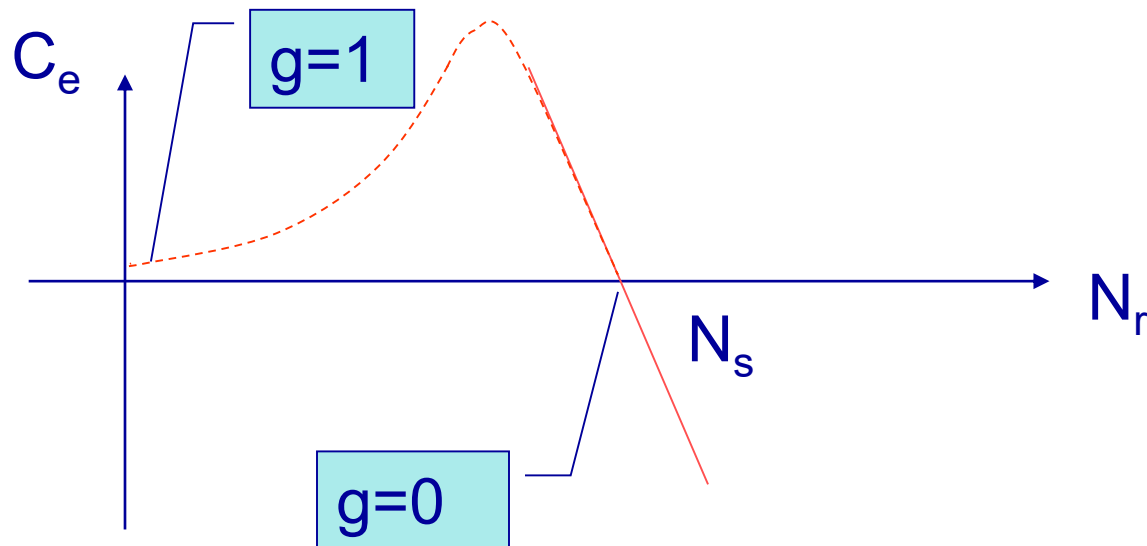
Soit :

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1v} + \left[\frac{n_2'}{n_1'} \right]^2 \underline{V}_1 \frac{g}{R_2}$$

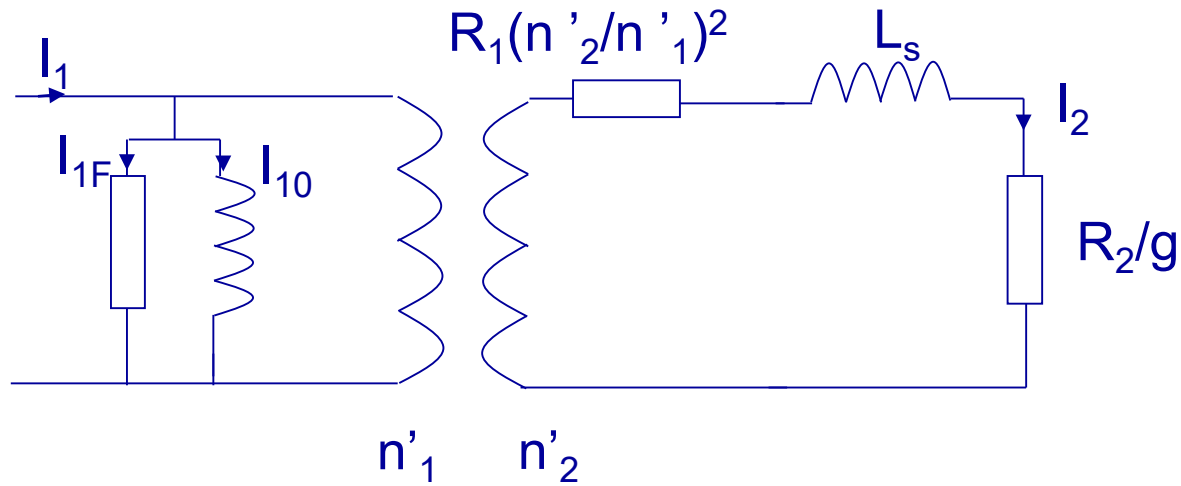
$$P_e = 3 \frac{R_2}{g} I_2^2 = 3 \frac{R_2}{g} \left[\frac{n_2'}{n_1'} \right]^2 V_1^2 \frac{g^2}{R_2^2} = C_e \Omega_s$$

Soit :

$$C_e = \frac{3}{\Omega_s} \left[\frac{n_2'}{n_1'} \right]^2 V_1^2 \frac{g}{R_2} = k V_1^2 \frac{g}{R_2}$$



Couple et courant à fort glissement



$$\underline{I_2} = \frac{n'_2}{n'_1} \underline{V_1} \frac{1}{R_1 \left(\frac{n'_2}{n'_1} \right)^2 + \frac{R_2}{g} + j\omega L_s}$$

Considérant que $R_1 \left(\frac{n'_2}{n'_1} \right)^2 \ll j\omega L_s$

$$\underline{I_2} = \frac{n'_2}{n'_1} \underline{V_1} \frac{1}{\frac{R_2}{g} + j\omega L_s}$$

$$C_e = \frac{3}{\Omega_s} \frac{R_2}{g} \left[\frac{n_2'}{n_1'} \right]^2 V_1^2 \frac{1}{\left[\frac{R_2}{g} \right]^2 + \omega^2 L_s^2}$$

$$C_e = \frac{3}{\Omega_s} \left[\frac{n_2'}{n_1'} \right]^2 V_1^2 \frac{1}{\omega L_s} \frac{1}{\frac{R_2}{g \omega L_s} + \frac{g \omega L_s}{R_2}}$$

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{3}{\Omega_s} \left[\frac{n_2'}{n_1'} \right]^2 \frac{1}{\omega L_s} \\ \Omega_s &= (2\pi.f)/p \\ \omega &= 2\pi.f \end{aligned} \right\} \Rightarrow K = \frac{k'}{f^2}$$

$$g_0 = \frac{R_2}{\omega L_s}$$

$$C_e = K \cdot V_1^2 \cdot \frac{1}{\frac{g_0}{g} + \frac{g}{g_0}}$$

C_e est max pour $g = g_0$ soit

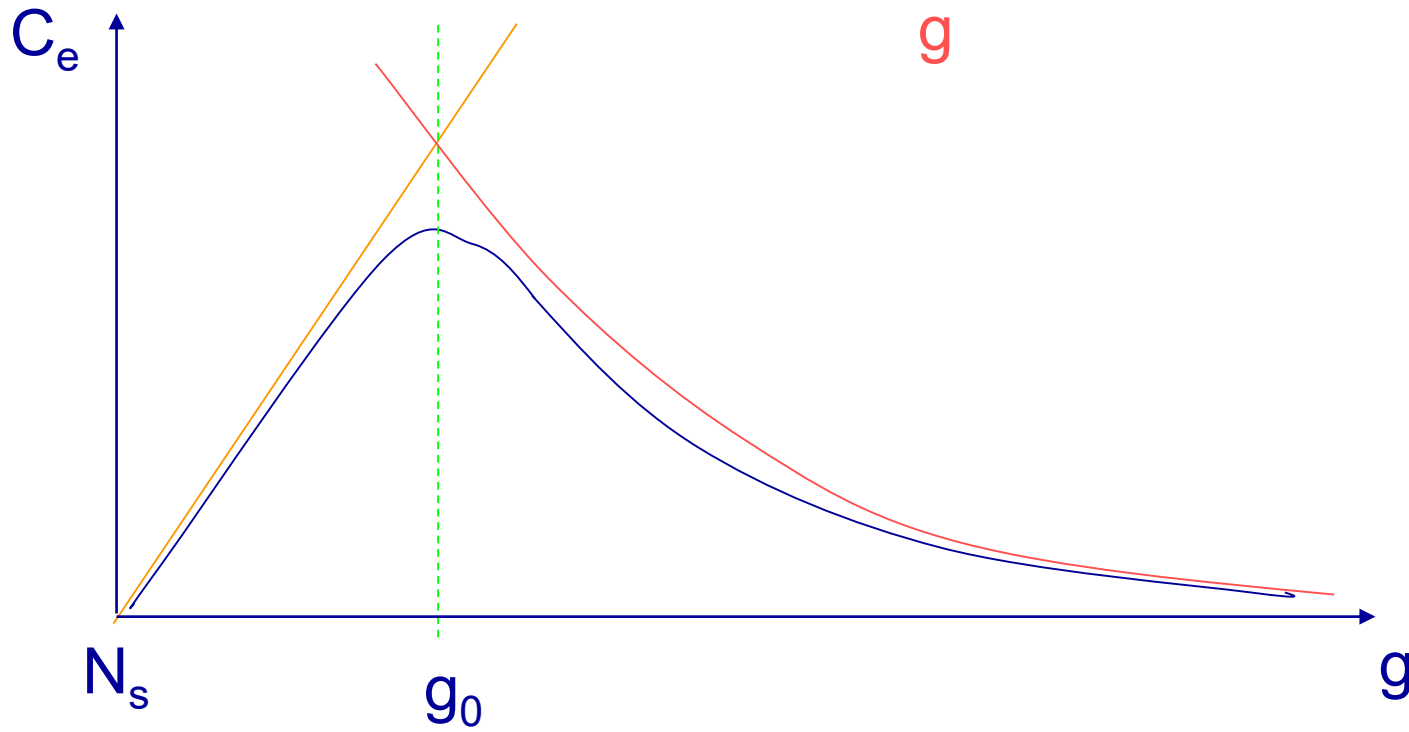
$$C_{e \max} = \frac{K V_1^2}{2} = k' \cdot \frac{V_1^2}{f^2}$$

$$g \ll g_0$$

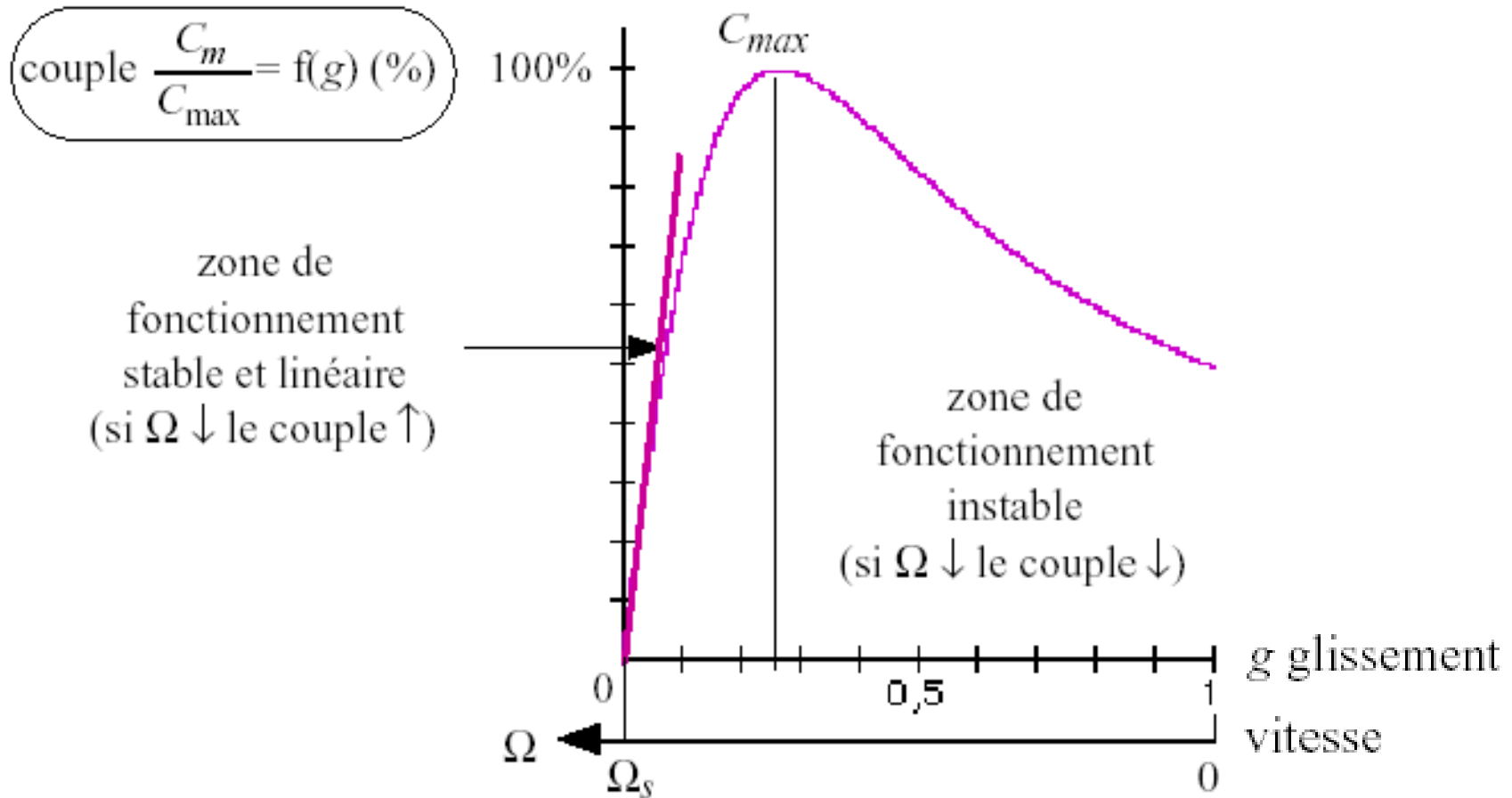
$$C_e = K V_1^2 \frac{g}{g_0}$$

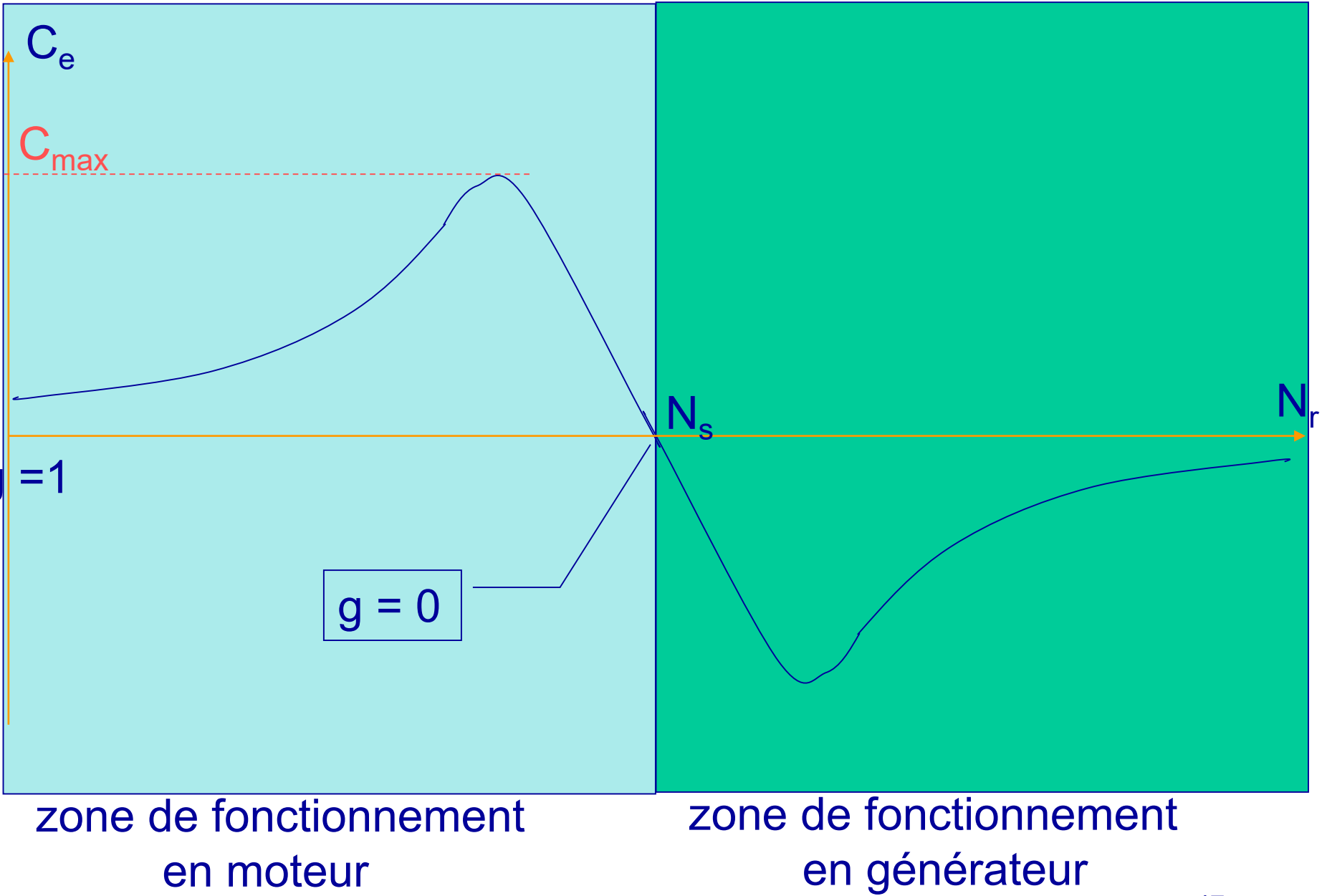
$$g \gg g_0$$

$$C_e = K V_1^2 \frac{g_0}{g}$$



La caractéristique mécanique statique d'une MAS déduite de l'équation du couple $C_m(g)$





Démarrage des Moteurs Asynchrones

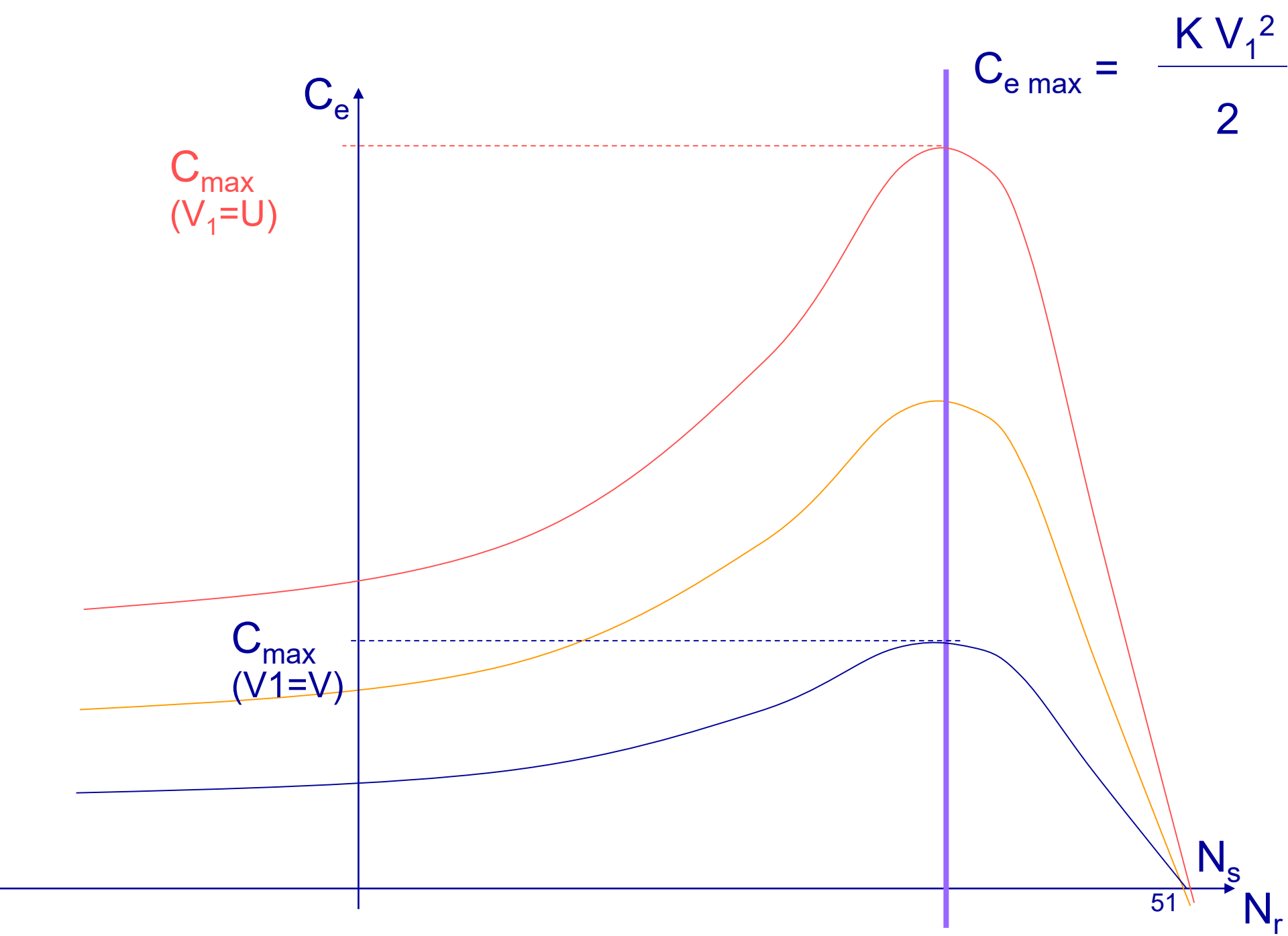
Lors de la mise sous tension d'un moteur asynchrone, celui-ci a un fort appel de courant qui peut provoquer des chutes de tension importantes dans une installation électrique.

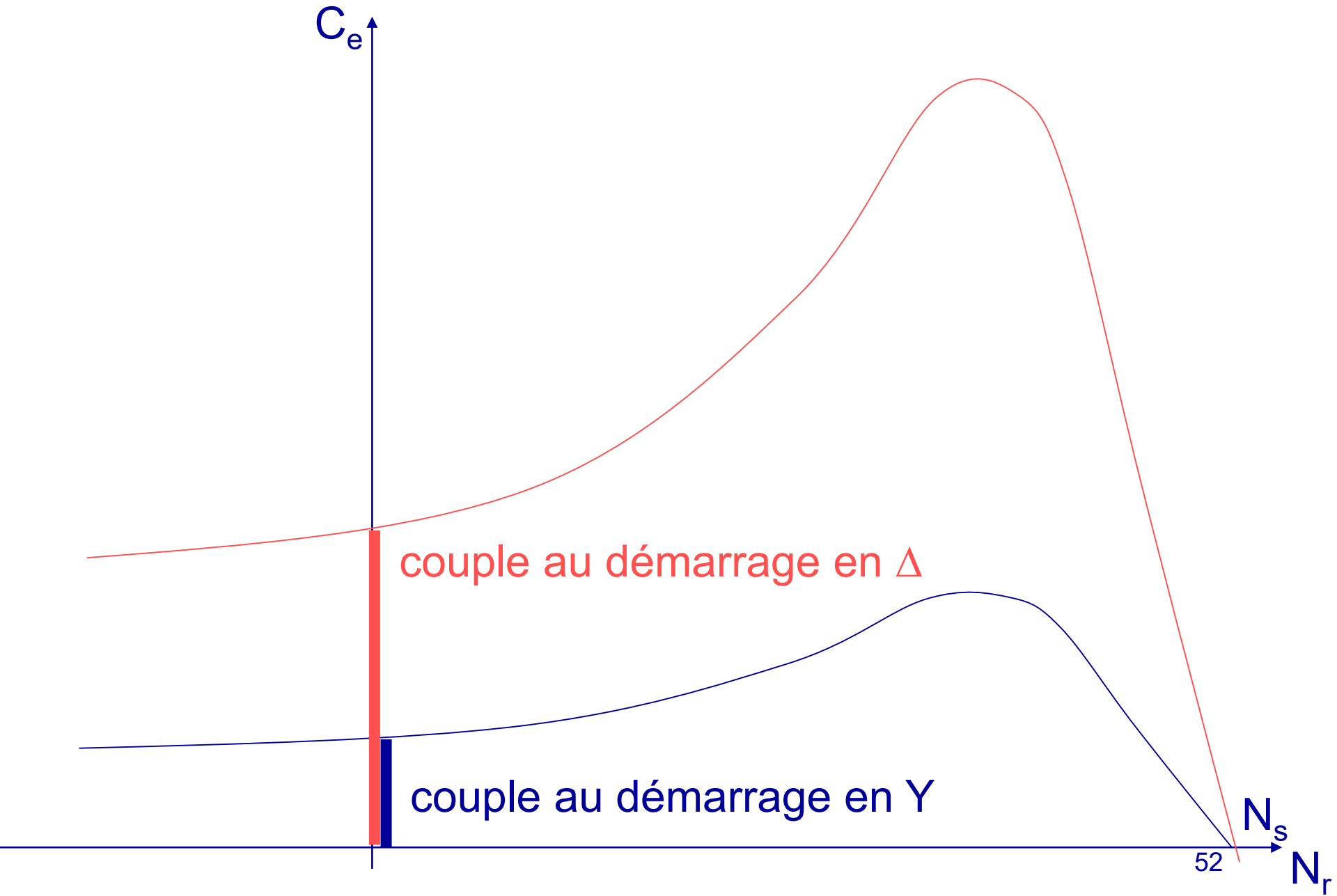
Il est donc logique de limiter le courant pendant le démarrage à une valeur acceptable.

Méthodes de démarrage:

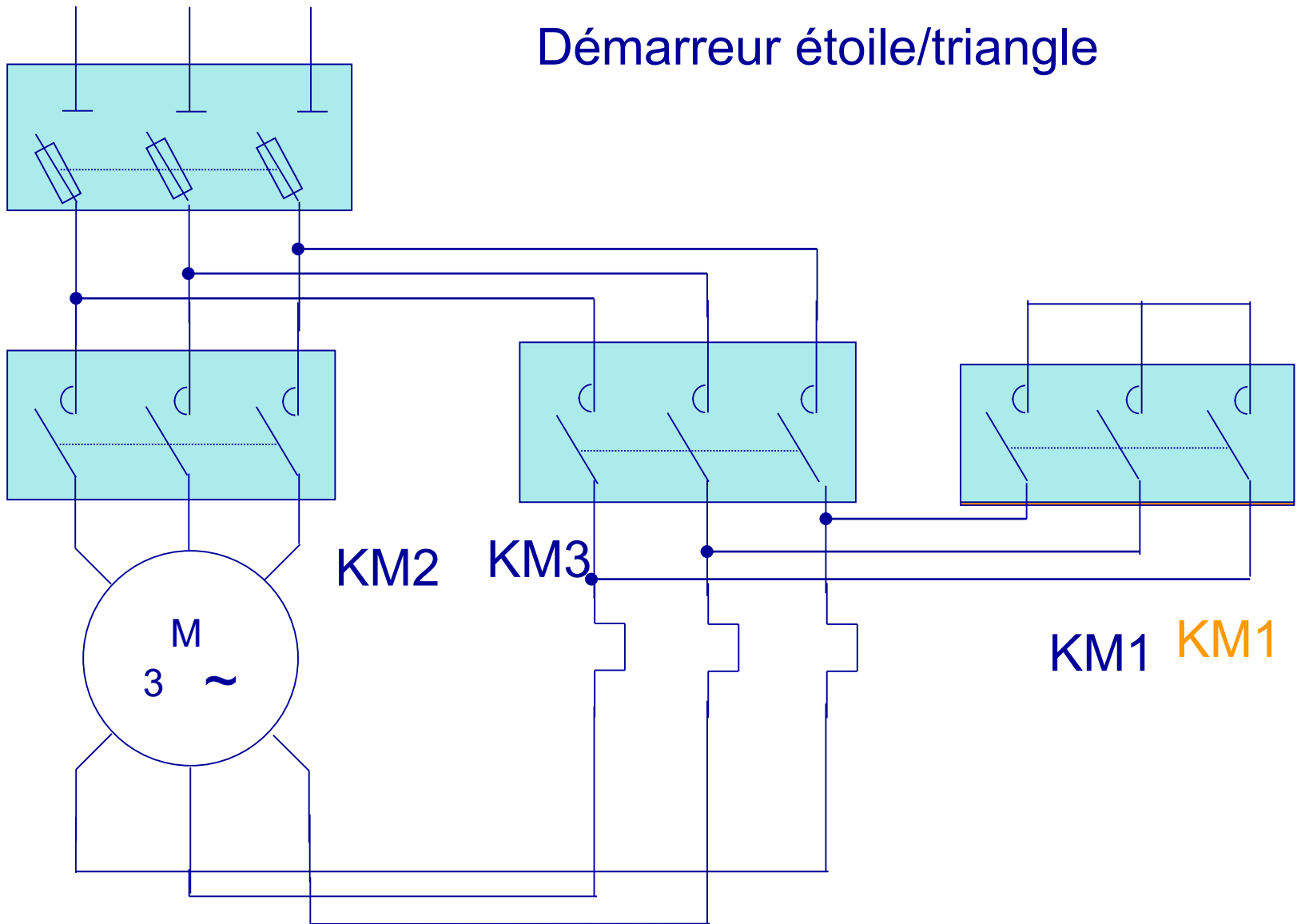
- Démarrage direct (pointe de courant au démarrage)
- Démarrage étoile triangle (les deux extrémités de chaque enroulement sont accessibles)
- Démarrage statorique à résistance (limitant ainsi le courant de démarrage)
- Démarrage par autotransformateur (variation de la tension d'alimentation)
- Démarrage rotorique (rotor bobiné + résistances)
- Variation de fréquence (rapport U/f constant)

Influence d'une variation de la tension d'alimentation statorique sur la caractéristique mécanique





Démarrateur étoile/triangle

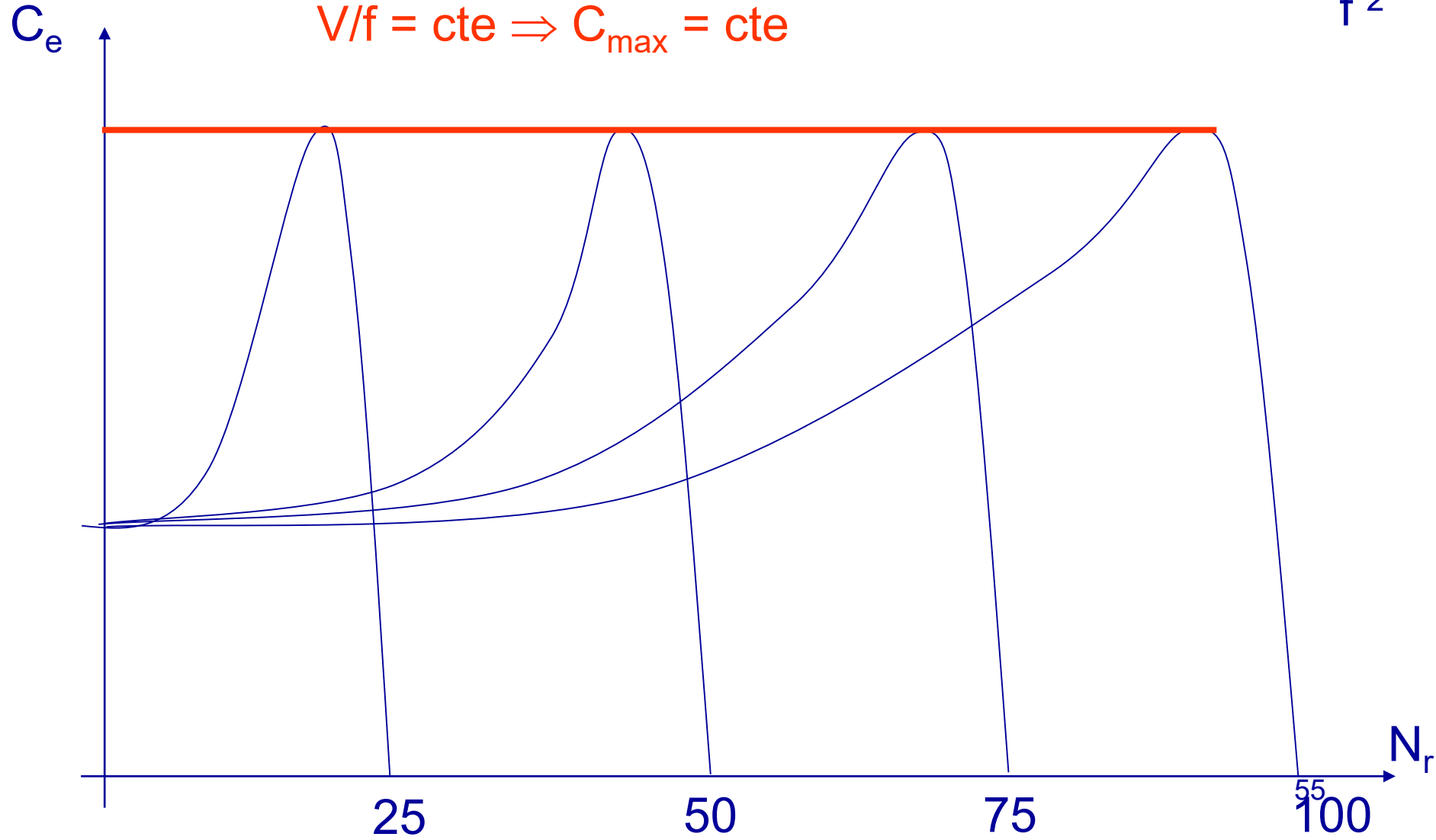


Influence d'une variation de la fréquence des tensions statoriques

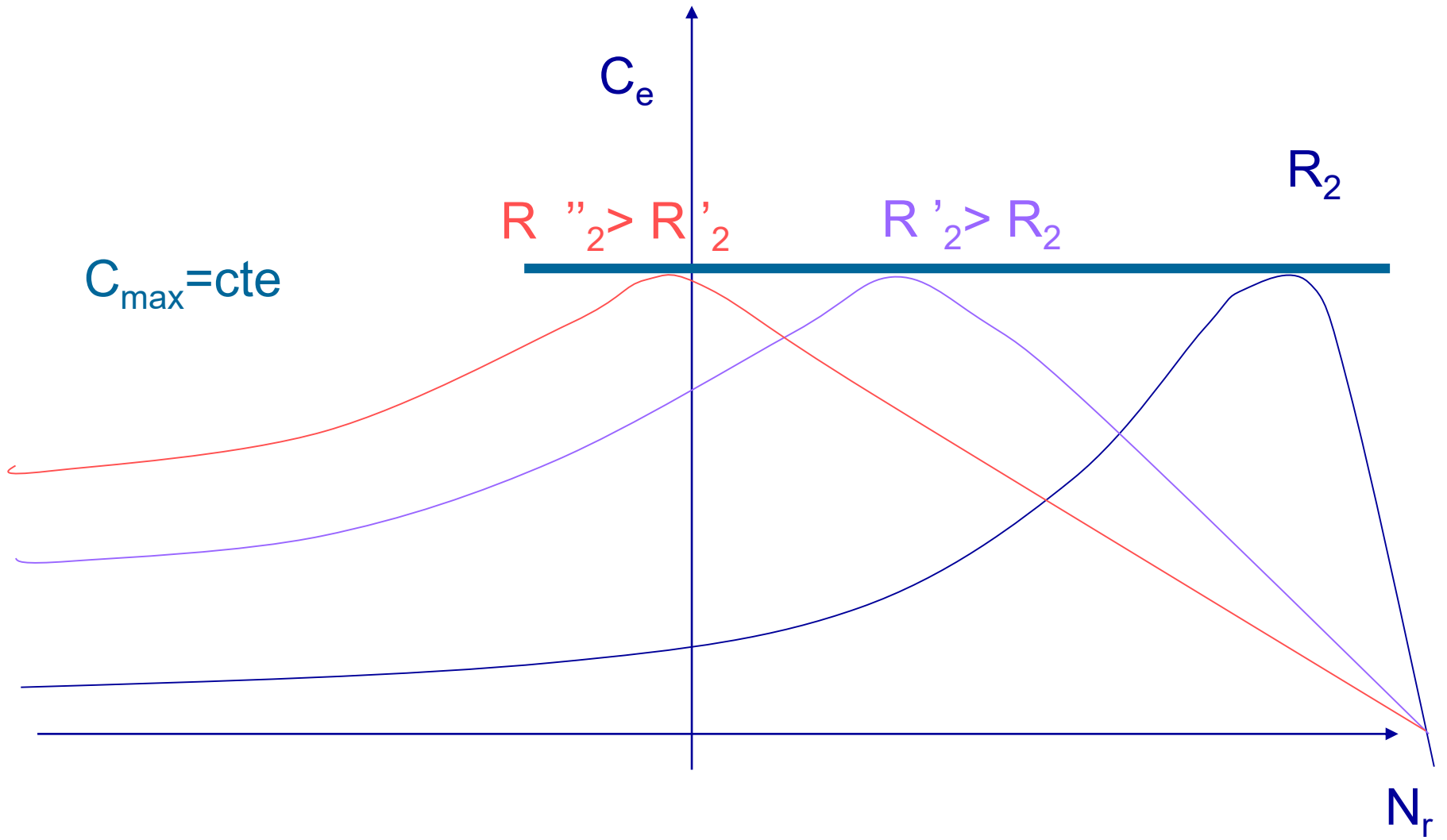
Le principe réellement utilisé consiste à conserver un rapport U/f de valeur constante à l'aide d'un onduleur MLI car:

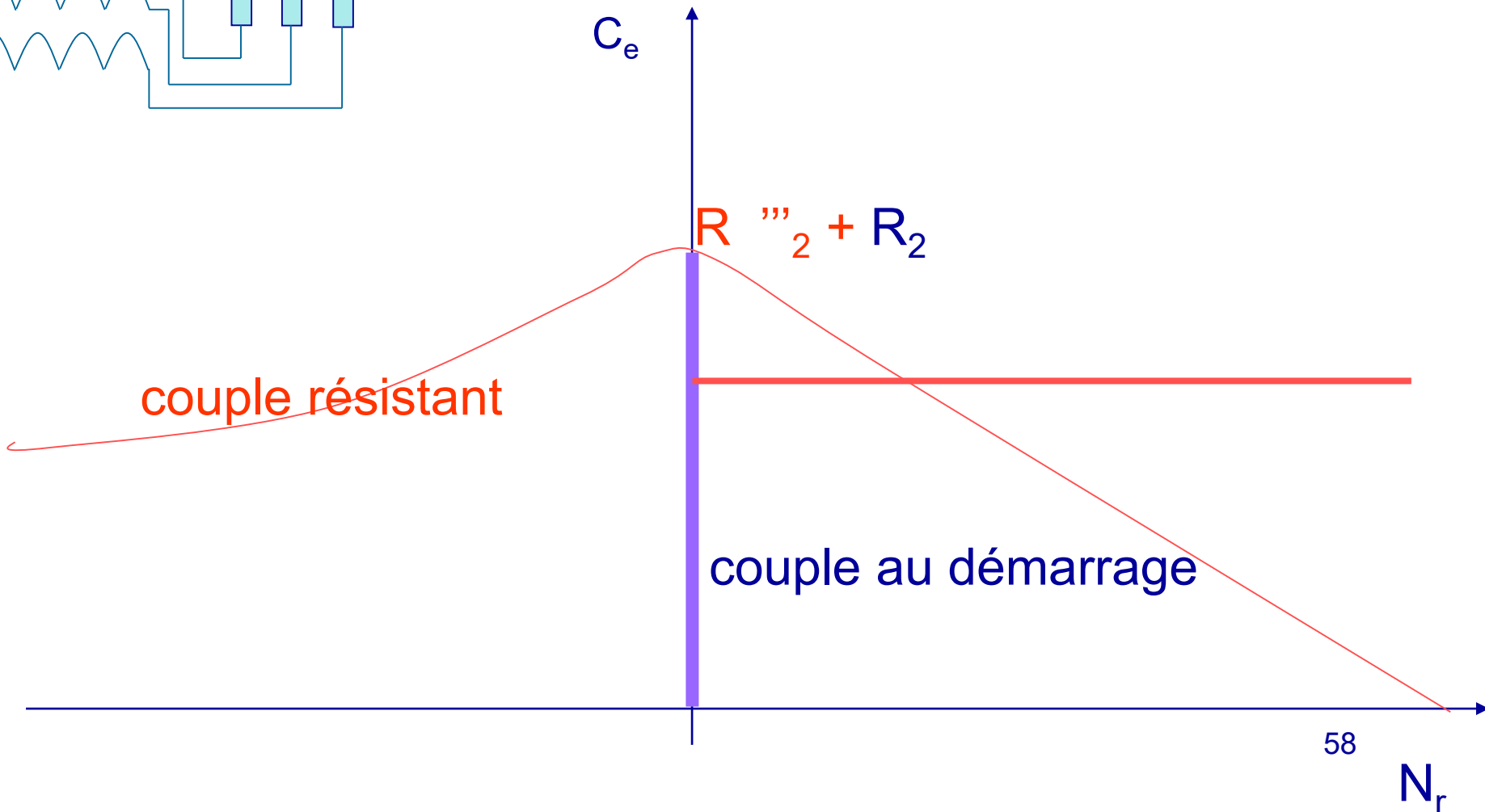
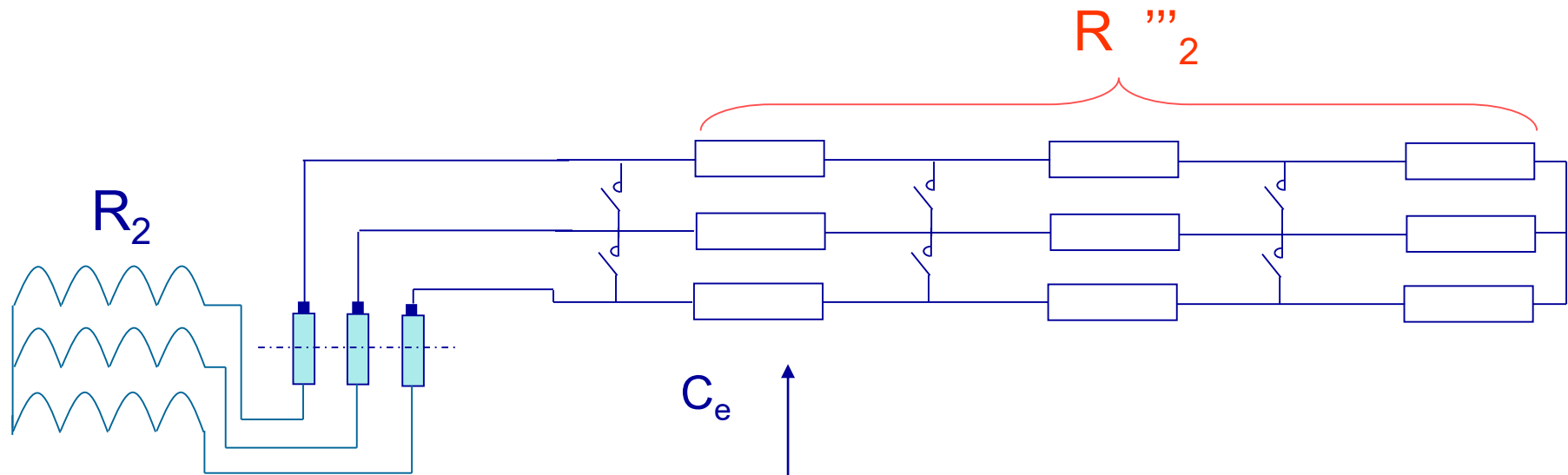
$$C_{\max} = k' \cdot \frac{V_1^2}{f^2}$$

$V/f = \text{cte} \Rightarrow C_{\max} = \text{cte}$

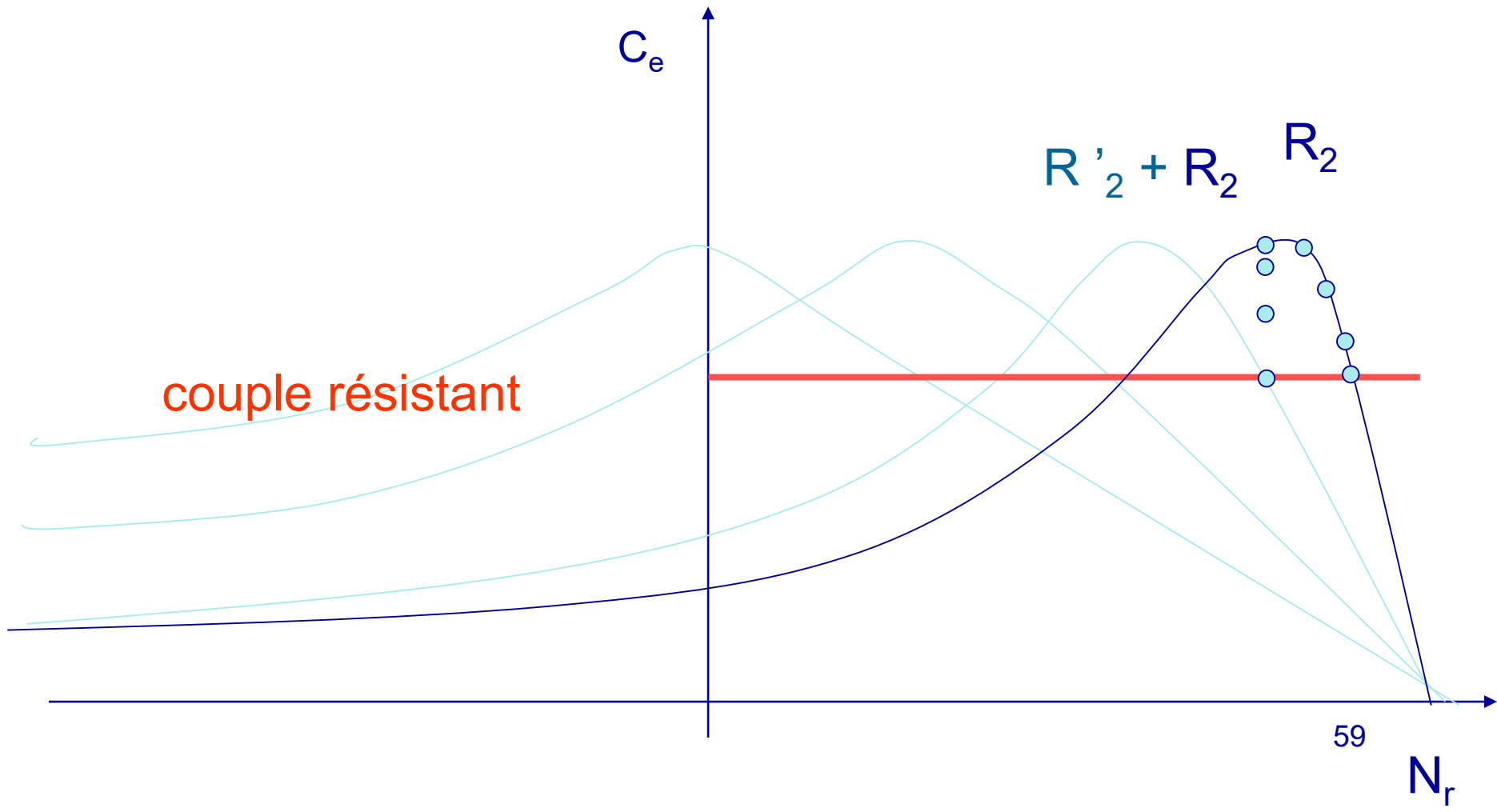


Influence d'une variation de la résistance rotorique sur la caractéristique mécanique





$$C_{\text{mot}} - C_{\text{résist}} = \Sigma J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$



Bibliographie

J.M. ESCANÉ, P. BASTARD : Réseaux électriques linéaires - Systèmes triphasés

Références : Techniques de l'ingénieur

Dossier : D80

Bases documentaires : Convertisseurs et machines électriques

Michel POLOUJADOFF : Machines asynchrones - Régime permanent

Références : Techniques de l'ingénieur

Dossier : D3480

Bases documentaires : Convertisseurs et machines électriques

Jacques SAINT-MICHEL : Bobinage des machines tournantes à courant alternatif

Références : Techniques de l'ingénieur

Dossier : D3420

Bases documentaires : Convertisseurs et machines électriques